



Escola de Camins
Escola Tècnica Superior d'Enginyeria de Camins, Canals i Ports
UPC BARCELONATECH

Desarrollo de aplicaciones inmersivas de Realidad Virtual y Aumentada para ensayos de estructuras de acero inoxidable

Trabajo realizado por:

Ruth Fabiola Claire Soliz

Dirigido por:

Rolando Antonio Chacón Flores

Máster en:

Ingeniería Estructural y de la Construcción

Barcelona, **Febrero de 2019**

Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental

TRABAJO FINAL DE MÁSTER

AGRADECIMIENTOS

Eterno agradecimiento a Dios, que es la luz del camino de mi vida, y sin él nada sería posible.

Este trabajo ha sido desarrollado en el marco del Proyecto BIA2016-75678-R, AEI/FEDER, UE "Comportamiento estructural de pórticos de acero inoxidable. Seguridad frente a acciones accidentales de sismo y fuego ", financiado por el MINECO (España).

La realización del proyecto ha sido dirigida por el tutor Rolando Chacón, a quien expreso mi sincero agradecimiento por su paciencia, dedicación, y facilidades que me brindó. Por darme la oportunidad de desarrollar un proyecto desafiante, que me permitió ampliar mis conocimientos en áreas nuevas.

Agradecimientos especiales al centro CIMNE (Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería), por su colaboración en el proyecto, brindándome las herramientas, bases y asistencia necesaria, que han hecho posible la realización de este trabajo.

A mi esposo Sergio, quien estuvo a mi lado durante toda esta etapa, y me impulsa cada día a alcanzar las metas que me propongo. Por el apoyo y la ayuda que me brindó, que fue fundamental para que este proyecto se realice satisfactoriamente.

A mis padres Ruth y Gastón, que son el motor de mi vida y a quienes dedico este proyecto. Por confiar en mí e impulsarme a cumplir un sueño que me permitió crecer profesional y personalmente. Por estar siempre presentes a pesar de la distancia, y gracias a su esfuerzo y sacrificio, son parte del equipo que hoy me llevaron a presentar mi Trabajo Final de Máster.

Agradezco a Gabriel Aramburo y Oscar de Coss, por su ayuda indispensable. A mi familia y amigos, a los que tuve el placer de conocer en Barcelona, y a los que desde Bolivia me brindaron su aliento para alcanzar esta meta.

RESUMEN

El acero inoxidable es un material que posee propiedades mecánicas beneficiosas para su uso en la construcción, como su alta resistencia a la corrosión y ductilidad. El proyecto se realiza en base a nuevos estudios realizados acerca de su comportamiento en estructuras nuevas como vigas, pilares y pórticos de sección hueca.

Las aplicaciones obtenidas han sido implementadas en los ensayos de dichas estructuras, ejecutados en el laboratorio de la Universidad Politécnica de Cataluña. En los cuales, se han considerado aspectos de seguridad durante su desarrollo.

Actualmente, existen muchos estudios enfocados en el uso de la Realidad Virtual (VR) y Realidad Aumentada (AR) dentro de distintos ámbitos, como es el área industrial, militar y la medicina. Sin embargo, muy pocos han aplicado esta tecnología en la rama de la ingeniería estructural.

En el presente proyecto, se han desarrollado aplicaciones de Realidad Virtual (VR) y Realidad Aumentada (AR) que funcionan a tiempo real. Dos de ellas son sistemas VR, que se aplican a ensayos de laboratorio de vigas y pilares, y la otra es un sistema AR, para ensayos de pórticos de acero inoxidable. Mediante las aplicaciones VR, el usuario es capaz de observar la ejecución de los ensayos dentro de un modelo totalmente virtual. Con la aplicación AR, el usuario visualiza elementos virtuales, a través de unas gafas AR (HoloLens), sobre el entorno real, como las reacciones, diagramas de momentos flectores, cortantes y axiles, la carga vertical aplicada, carga horizontal variable, y el desplazamiento horizontal experimentado por el pórtico.

Las aplicaciones desarrolladas comprenden el estudio y desarrollo de códigos basados en matemática estructural de la deformada en vigas y pilares, y el análisis estructural del pórtico bajo el método matricial. En todos los casos se adoptó un análisis lineal.

Las herramientas utilizadas para el desarrollo del proyecto comprenden un sensor de ultrasonido HC-SR04, microcontroladores Arduino Nano y ESP32, ordenador portátil, teléfono móvil y gafas AR Microsoft HoloLens. Entre el Software utilizado se encuentra Revit, Unity, Vuforia, Matlab, Arduino IDE y FrameDesign.

Palabras clave: Acero Inoxidable, Realidad Virtual, Realidad Aumentada, Sensor, EPS32, Arduino, Microsoft HoloLens.

ABSTRACT

Stainless steel is a material that has many beneficial mechanical properties to use in construction, such as its high resistance to corrosion and ductility. This project is based on new studies focused on the behavior of hollow section beams, columns and frames, made of this material.

The developed applications have been implemented in laboratory tests of the structures mentioned before, that were executed in the UPC University. In which, security aspects have been considered.

Currently, there are many studies focused on the use of Virtual Reality (VR) and Augmented Reality (AR) within different area, such as industrial, military and medicine. However, few of them have applied this technology in the structural engineering field.

In this project, real time applications of Virtual Reality and Augmented Reality were developed. Two of them are VR apps, which were applied in laboratory tests of beams and columns, and one of them is an AR app, applied in a stainless steel frame test. Through the VR applications, the user is able to observe the execution of the tests within a totally virtual model. With the AR app, the user visualizes virtual elements, through AR glasses (HoloLens), on the real environment, such as reactions, bending, shear and axial moment diagrams, vertical and horizontal load, and the lateral displacement of the frame.

These applications include the study and development of program codes based on structural mathematics formulation of deformed beams and columns, and also the matrix linear method in frames.

The tools used for the development of this project, include an ultrasound sensor HC-SR04, Arduino Nano and ESP32 microcontrollers, a laptop and AR Microsoft HoloLens glasses. Talking about the Software, it has been used Revit, Unity, Vuforia, Matlab, Arduino IDE and FrameDesign.

Keywords: Stainless Steel, Virtual Reality, Augmented Reality, Sensor, ESP32, Arduino, Microsoft HoloLens.

ÍNDICE GENERAL

CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN	1
1.1. Motivación.....	1
1.2. Objetivos	2
1.2.1. Objetivo general	2
1.2.2. Objetivos específicos	2
1.3. Metodología	2
1.4. Alcance y límites del proyecto	3
CAPÍTULO II: ESTADO DEL CONOCIMIENTO.....	5
2.1. Acero inoxidable	5
2.1.1. Definición e historia.....	5
2.1.2. Tipos de acero inoxidable.....	5
2.1.3. Propiedades del acero inoxidable: Comportamiento tenso-deformacional básico.	6
2.1.4. Clasificación de las secciones transversales	8
2.1.5. Normativa aplicable	8
2.1.6. Aplicaciones del acero inoxidable en la industria de la construcción.....	8
2.1.7. Pórticos de acero inoxidable	9
2.1.8. Futuros estudios relacionados con el acero inoxidable	10
2.2. Realidad virtual y aumentada	11
2.2.1. Antecedentes.....	11
2.2.2. Realidad Virtual y Aumentada.....	12
2.2.3. Realidad Virtual y Aumentada en el sector AIC.....	13
CAPÍTULO III: CONCEPTOS ESTRUCTURALES	25
3.1. Introducción	25
3.2. Bases matemáticas para las estructuras estudiadas	25
3.2.1. Análisis estructural vigas	25
3.2.2. Análisis estructural pilar	27
3.2.3. Análisis estructural pórticos	28
CAPÍTULO IV: SISTEMAS DESARROLLADOS	35
4.1. Diseño de los sistemas	35
4.1.1. Sistema de Realidad virtual	35
4.1.2. Sistema de Realidad aumentada	41
4.2. Herramientas de medición	52
4.2.1. Sensor de ultrasonido.....	52
4.2.2. Sistema de adquisición de datos: Arduino Nano	54
4.2.3. Sistema de adquisición de datos: ESP32	55

4.2.4. Anatomía de un código en Arduino	56
4.3. Herramientas de cálculo	57
4.4. Herramientas de visualización	58
4.4.1. Entorno de realidad virtual	58
4.4.2. Entorno de realidad aumentada	60
4.4.3. Software Unity	61
4.4.4. Anatomía de un Script en Visual Studio	63
CAPÍTULO V: APLICACIÓN EN ENSAYOS DE LABORATORIO	65
5.1. Ensayos de vigas	65
5.2. Ensayos de pilares	71
5.3. Ensayos de pórticos	76
CAPÍTULO VI: CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN	93
6.1. Conclusiones	93
6.2. Recomendaciones	95
6.3. Futuras líneas de investigación	95
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	99

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1. SECCIONES DE VIGAS ENSAYADAS EN LABORATORIO	65
TABLA 2. RESULTADOS EXPERIMENTALES EN ENSAYOS DE VIGAS.....	71
TABLA 3. RESULTADOS EXPERIMENTALES EN ENSAYOS DE PILARES.....	76

INDICE DE FIGURAS

FIGURA 1. CURVA TENSIÓN – DEFORMACIÓN DEL ACERO INOXIDABLE Y DEL ACERO AL CARBONO	7
FIGURA 2. DEFINICIÓN DE LA RESISTENCIA CORRESPONDIENTE A UNA DEFORMACIÓN REMANENTE DE 0.2%.....	7
FIGURA 3. NIVELES DE TRANSICIÓN ENTRE EL MUNDO REAL Y VIRTUAL.	11
FIGURA 4. PROVEEDORES DE TECNOLOGÍA AR/VR	12
FIGURA 5. GENERACIÓN DE MODELOS DE REALIDAD VIRTUAL APLICADOS EN BIM	15
FIGURA 6. EJEMPLO DE CAMBIOS Y VISUALIZACIÓN VR A TIEMPO REAL	16
FIGURA 7. PROCESO DE TRANSFORMACIÓN DE CAD A VR.....	18
FIGURA 8. SOFTWARE UTILIZADO EN SISTEMAS VR EN PROCESO CONSTRUCTIVO DE PUENTES.....	19
FIGURA 9. VISUALIZACIÓN DEL PROCESO CONSTRUCTIVO DE UN PUENTE EN VR.	19
FIGURA 10. MODELO ISOMÉTRICO 2D (A) VS. MODELO SISTEMA AR (B)	20
FIGURA 11. INTERACCIÓN DE LOS AGENTES PARTICIPANTES EN UNA MESA BIM.....	21
FIGURA 12. CAM-ART, SISTEMA AR APLICADA EN ESTUDIANTES DE INGENIERÍA CIVIL.	22
FIGURA 13. INSPECCIÓN CON AR	23
FIGURA 14. INSPECCIÓN TRADICIONAL DE DESPLAZAMIENTOS	23
FIGURA 15. DURACIÓN DE INSPECCIÓN CON MÉTODO TRADICIONAL Y CON SISTEMA AR.....	24
FIGURA 16. ESQUEMA VIGA ANALIZADA	26
FIGURA 17. SECUENCIA DE CÁLCULO DEL MÉTODO DE RIGIDEZ.....	29
FIGURA 18. TRANSFORMACIÓN DE SISTEMA DE REFERENCIA	31
FIGURA 19. NUMERACIÓN DE NODOS Y ESTRUCTURA DE LA MATRIZ DE RIGIDEZ GLOBAL	32
FIGURA 20. ARQUITECTURA SISTEMA REALIDAD VIRTUAL	35
FIGURA 21. MONTAJE DEL SISTEMA ELECTRÓNICO PARA TOMA DE DATO CON PLACA ARDUINO	36
FIGURA 22. CONEXIÓN SENSOR CON PLACA ESP32	37
FIGURA 23. ELEMENTO DISCRETIZADO MODELADO EN REVIT	38
FIGURA 24. FOTOGRAFÍA DEL ENTORNO REAL.	38
FIGURA 25. MODELO COMPLETO LABORATORIO PROGRAMA REVIT	39
FIGURA 26. VISTA INTERIOR MODELO LABORATORIO PROGRAMA REVIT	39
FIGURA 27. ENTORNO VIRTUAL ENSAYO VIGAS PROGRAMA UNITY.....	40
FIGURA 28. ENTORNO VIRTUAL ENSAYO PILARES PROGRAMA UNITY.....	40
FIGURA 29. ARQUITECTURA SISTEMA REALIDAD AUMENTADA	42
FIGURA 30. FLUJO DEL DATO EN LA APLICACIÓN AR	44
FIGURA 31. DATOS DE SALIDA CÓDIGO MATLAB	45
FIGURA 32. NUMERACIÓN DE NODOS, BARRAS, GEOMETRÍA Y NOMBRE VARIABLES PÓRTICO	46
FIGURA 33. ELEMENTO “LINERENDER” QUE REPRESENTA EL DIAGRAMA DE MOMENTOS DEL PILAR.	49
FIGURA 34. ENTORNO DE DESARROLLO UNITY.....	50

FIGURA 35. BOTONES PARA VISUALIZAR/OCULTAR (A) REACCIONES Y DATOS (B) DIAGRAMAS DE ESFUERZOS.....	50
FIGURA 36. ALERTA DE SEGURIDAD AL SOBREPASAR LÍMITES.....	51
FIGURA 37. SENSOR DE ULTRASONIDO HC-SR04	52
FIGURA 38. FUNCIONAMIENTO SENSOR DE ULTRASONIDO HC-SR04	53
FIGURA 39. CALCULO DE LA DISTANCIA UTILIZANDO EL SENSOR HC-SR04	53
FIGURA 40. PLACA ARDUINO NANO	55
FIGURA 41. PLACA ESP32	56
FIGURA 42. ANATOMÍA DE UN CÓDIGO ARDUINO	56
FIGURA 43. GAFAS DE VR HTC VIVE.....	59
FIGURA 44. USUARIO DE SISTEMA VR UTILIZANDO GAFAS HTC VIVE	59
FIGURA 45. ALGUNOS TIPOS Y MARCAR DE GAFAS VR	60
FIGURA 46. MICROSOFT HOLOLENS	61
FIGURA 47. USUARIOS INTERACTUANDO CON AR MEDIANTE HOLOLENS.....	61
FIGURA 48. INTERFAZ DE UNITY.....	63
FIGURA 49. ANATOMÍA SCRIPT EN UNITY	64
FIGURA 50. ESQUEMA ENSAYO VIGAS.....	65
FIGURA 51. SECCIONES DE VIGAS ENSAYADAS EN LABORATORIO	66
FIGURA 52. UBICACIÓN SENSOR DE ULTRASONIDO EN ENSAYO DE VIGAS.....	66
FIGURA 53. DATOS DE ENTRADA APLICACIÓN REALIDAD VIRTUAL VIGAS	67
FIGURA 54. ENSAYO VIGA EN ESTADO INICIAL (ENTORNO REAL)	67
FIGURA 55. VISTA LATERAL ENSAYO VIGA EN ESTADO INICIAL (ENTORNO REAL)	68
FIGURA 56. ENSAYO VIGA EN ESTADO DEFORMADO (ENTORNO REAL)	68
FIGURA 57. ENSAYO VIGA EN ESTADO DEFORMADO (ENTORNO VIRTUAL).....	68
FIGURA 58. ENTORNO REAL VS. ENTORNO VIRTUAL	69
FIGURA 59. ENTORNO REAL Y VIRTUAL DURANTE EL ENSAYO	69
FIGURA 60. PROGRESO DEL DESARROLLO DE LA APLICACIÓN VR EN CADA ENSAYO DE VIGAS	70
FIGURA 61. ENSAYO PILARES	71
FIGURA 62. MONTAJE ENSAYO PILARES	72
FIGURA 63. UBICACIÓN SENSOR DE ULTRASONIDO EN ENSAYO DE PILARES.....	73
FIGURA 64. DATOS A DEFINIR ANTES DE INICIAR A EJECUTAR LA APLICACIÓN DE REALIDAD VIRTUAL.....	73
FIGURA 65. ENSAYO PILAR EN ESTADO INICIAL.....	74
FIGURA 66. ENSAYO PILAR EN ESTADO DEFORMADO.....	74
FIGURA 67. ENSAYO PILAR VISTO EN ENTORNO REAL Y VIRTUAL	75
FIGURA 68. VISTA AMPLIA EN APLICACIÓN DE REALIDAD VIRTUAL EN ENSAYO DE PILARES	75
FIGURA 69. ENSAYO PILAR DEFORMADO VISTO DESDE APLICACIÓN VR (ESCALA=1)	75
FIGURA 70. PILARES DEFORMADOS VISTOS EN APLICACIÓN VR A MAYORES ESCALAS	76
FIGURA 71. ESQUEMA MONTAJE ENSAYO.....	77
FIGURA 72. FOTOGRAFÍA MONTAJE ENSAYO PÓRTICO	77
FIGURA 73. POSICIÓN MARCADOR (TARGET)	78

FIGURA 74. POSICIÓN DEL SENSOR DE ULTRASONIDO EN EL ENSAYO DEL PÓRTICO	78
FIGURA 75. POSICIÓN DEL SENSOR Y MARCADOR EN MONTAJE DEL ENSAYO DEL PÓRTICO (NODO 3)	79
FIGURA 76. HERRAMIENTAS ADICIONALES NECESARIAS EN EL ENSAYO (ORDENADOR, TELÉFONO MÓVIL Y GAFAS HOLOLENS)	79
FIGURA 77. VENTANA DE RESULTADOS MATLAB DURANTE LA EJECUCIÓN DE LA APLICACIÓN AR	81
FIGURA 78. RESULTADOS DE CÁLCULO EN MATLAB PARA D=15[CM]	81
FIGURA 79. REACCIONES NODO 4 Y FUERZA HORIZONTAL ACTUANTE EN AR, Y RESULTADOS MATLAB	82
FIGURA 80. REACCIONES NODO 3 Y DESPLAZAMIENTO REGISTRADO EN AR, Y RESULTADOS MATLAB	82
FIGURA 81. DIAGRAMA DE ESFUERZOS CORTANTES DURANTE LAS PRUEBAS DEL SISTEMA AR	83
FIGURA 82. DIAGRAMA DE MOMENTOS FLECTORES DURANTE LAS PRUEBAS DEL SISTEMA AR	83
FIGURA 83. DIAGRAMA DE MOMENTOS FLECTORES DURANTE LAS PRUEBAS DEL SISTEMA AR	83
FIGURA 84. DIAGRAMA DE ESFUERZOS AXILES DURANTE LAS PRUEBAS DEL SISTEMA AR	84
FIGURA 85. INTERACCIÓN DEL USUARIO DURANTE LAS PRUEBAS DEL SISTEMA AR (BOTONES, DIAGRAMA DE MOMENTOS Y ESFUERZOS CORTANTES)	84
FIGURA 86. SEÑAL DE PELIGRO POR INGRESAR DENTRO DEL ÁREA RESTRINGIDA	85
FIGURA 87. PROFESORES DE LA UPC INTERACTUANDO CON LA APLICACIÓN AR EN LABORATORIO DE ESTRUCTURAS ..	85
FIGURA 88. REACCIONES OBTENIDAS EN APLICACIÓN "FRAMEDESIGN"	86
FIGURA 89. DIAGRAMA DE ESFUERZOS CORTANTES EN APLICACIÓN "FRAMEDESIGN"	86
FIGURA 90. DIAGRAMA DE MOMENTOS FLECTORES EN APLICACIÓN "FRAMEDESIGN"	86
FIGURA 91. DIAGRAMA DE ESFUERZOS AXILES EN APLICACIÓN "FRAMEDESIGN"	87
FIGURA 92. PÓRTICO ANTES Y DESPUÉS DE SER ENSAYADO	87
FIGURA 93. DIAGRAMAS DE MOMENTOS, AXILES Y CORTANTES VISUALIZADOS EN AR DURANTE ENSAYO DE PÓRTICO	88
FIGURA 94. CARGA VERTICAL APLICADA Y DIAGRAMA DE MOMENTOS FLECTORES VISUALIZADOS EN AR	88
FIGURA 95. REACCIONES EN NODO 4 Y FUERZA HORIZONTAL APLICADA, VISUALIZADAS EN AR	88
FIGURA 96. REACCIONES EN NODO 3 Y DESPLAZAMIENTO, VISUALIZADOS EN AR DURANTE ENSAYO DEL PÓRTICO	89
FIGURA 97. DIAGRAMAS DE MOMENTOS FLECTORES VISUALIZADOS EN AR DURANTE ENSAYO DEL PÓRTICO	89
FIGURA 98. DIAGRAMAS DE ESFUERZOS CORTANTES VISUALIZADOS EN AR DURANTE ENSAYO DEL PÓRTICO	89
FIGURA 100. SEÑAL DE PELIGRO AL SOBREPASAR LOS LÍMITES DE SEGURIDAD DURANTE ENSAYO DE PÓRTICO	90
FIGURA 101. DIAGRAMA LINEAL VS. NO LINEAL, VALORES EXTRAÍDOS DEL ENSAYO DEL PÓRTICO	91

CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN

1.1. Motivación

El acero inoxidable es un material cada vez más utilizado en el ámbito de la construcción, debido a sus ventajosas propiedades. Actualmente, se está estudiando su comportamiento en estructuras nuevas, como vigas, pilares y pórticos de sección hueca, mediante ensayos ejecutados en el laboratorio de estructuras de la Universidad Politécnica de Cataluña, en los cuales se pretende implementar las aplicaciones a desarrollarse en el proyecto.

Es importante que dentro de la ejecución de estos ensayos, se tomen en cuenta medidas de seguridad que garanticen una práctica adecuada y completa. Por este motivo, se considerarán elementos relacionados con este tema dentro de los sistemas desarrollados.

La tecnología se encuentra en un continuo y acelerado avance, alcanzando niveles sorprendentes, transportando al ser humano a una era rodeada de herramientas que facilitan su trabajo en distintas áreas. Durante las últimas dos décadas, se han estudiado y desarrollado muchas aplicaciones de Realidad Virtual y Aumentada. En el área de la ingeniería civil, están siendo utilizadas en el sector de gestión, construcción, ventas y arquitectura, sin embargo, son pocos los estudios que las utilizan en el área de la Ingeniería Estructural.

En el presente trabajo se ha desarrollado una aplicación AR, que permite agilizar el trabajo del ingeniero estructural, a través de una visualización de resultados de cálculo inmediata, y mediante una toma de datos a tiempo real. Asimismo, se desarrollaron aplicaciones VR, en las que el usuario es capaz de contemplar el estado de una estructura desde otro espacio, con la sensación de estar inmerso en él.

Además de abarcar el área tecnológica, científica, ingenieril y visual, el proyecto pretende constituirse en una herramienta de cálculo. Por este motivo, también se estudian las bases matemáticas de deformaciones en vigas y pilares, y el análisis matricial de pórticos en el rango elástico lineal.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo general

Desarrollar sistemas de realidad virtual y aumentada, para ser aplicados en el campo de la ingeniería estructural, mediante ensayos de laboratorio realizados en estructuras de acero inoxidable.

1.2.2. Objetivos específicos

Para alcanzar el objetivo general, se plantean los siguientes objetivos específicos:

- ✓ Desarrollar un sistema de lectura de un dato físico utilizando un sensor.
- ✓ Diseñar e implementar un sistema de procesamiento y envío de datos utilizando microcontroladores.
- ✓ Desarrollar códigos de cálculo en base a la matemática estructural de vigas, pilares y pórticos.
- ✓ Diseñar e implementar un sistema de Realidad Virtual para ensayos de vigas y pilares de acero inoxidable.
- ✓ Diseñar e implementar un sistema de Realidad Aumentada para ensayos de pórticos de acero inoxidable.
- ✓ Emplear las aplicaciones VR y AR desarrolladas en ensayos reales de vigas, pilares y pórticos de acero inoxidable.

1.3. Metodología

La metodología que se llevó a cabo en el presente proyecto, consiste en utilizar un sensor que nos permita obtener un dato físico (distancia), el cual proporciona información sobre el desplazamiento a tiempo real, que se produce al ensayar distintos tipos de elementos de acero inoxidable.

Utilizando herramientas de procesamiento de datos, el dato obtenido del ensayo se envía al ordenador, donde se lo procesa para obtener resultados reales, basándose en métodos matemáticos.

Posteriormente, se muestran los resultados utilizando herramientas tecnológicas inmersivas (Realidad Virtual y Aumentada) a través de dispositivos aptos para tal fin.

Durante el transcurso del desarrollo de las aplicaciones de Realidad Virtual, se realizan pruebas en ensayos reales de laboratorio, para esto:

- ✓ Se realizan cuatro ensayos de vigas de acero inoxidable de distintas clases y en cada uno de ellos, se efectúan avances y mejoras en la aplicación.
- ✓ Se ensayan cuatro pilares de acero inoxidable, y al igual que el caso anterior, se realizan mejoras en la aplicación de realidad virtual.

En el caso del sistema de Realidad Aumentada, éste se aplica en ensayos de pórticos de acero inoxidable.

Finalmente, se extraen conclusiones y se sugieren avances futuros, acerca del uso de esta tecnología en el ámbito de la ingeniería estructural.

1.4. Alcance y límites del proyecto

En el proyecto se desarrollarán tres aplicaciones, dos de realidad virtual, y una de realidad aumentada. Serán diseñadas específicamente para ser aplicadas en los ensayos de laboratorio descritos en el presente proyecto. Las dos primeras, serán aplicadas en ensayos de vigas y pilares, y la última, en ensayos de pórticos de acero inoxidable, que se ejecutarán en el marco del Proyecto BIA2016-75678-R, financiado por el MINECO (España).

Las aplicaciones de realidad virtual a desarrollarse, se limitarán únicamente a la visualización virtual del entorno de los ensayos mencionados. En base a la deformada leída por el sensor, y a las ecuaciones de la elástica, se modelará el elemento y el entorno a tiempo real. La aplicación será visualizada utilizando las gafas HTC Vive o desde el ordenador.

En el caso del sistema de realidad aumentada, se desarrollará una aplicación de cálculo estructural a tiempo real, la cual, en base al dato de la deformada, proporcionará los resultados del análisis (fuerza que está siendo aplicada, reacciones en las bases, gráficas de momentos, cortantes y axiles) a ser visualizados como elementos virtuales, mediante las gafas AR HoloLens, proporcionadas por el centro CIMNE.

Se utilizarán herramientas electrónicas de bajo coste, limitando la lectura del desplazamiento a una precisión en centímetros. Entre estas herramientas, además del sensor de ultrasonido HC-SR04, se encuentran los microcontroladores Arduino y ESP32.

En cuanto al software, se utilizarán herramientas Open-source (de código abierto, gratuitas), como es el caso de Arduino IDE [1], para la el desarrollo de los códigos de programación de los microcontroladores. Además de otros software de propiedad con licencias para estudiantes, como es el caso del programa Matlab [2] (utilizado para los cálculos matemáticos), Unity [3] (para visualización VR y AR), junto con el paquete de desarrollo Vuforia [4], y Revit [5] (para el modelado del entorno). Por otro lado, se utilizará la aplicación gratuita para móvil FrameDesign [6], para la verificación de los cálculos.

En todos los casos, las ecuaciones utilizadas se basarán en la teoría de análisis estructural elástico lineal. En el caso de realidad virtual, se utilizarán las ecuaciones básicas de la elástica en una viga y pilar. Para el cálculo del pórtico, se utilizará el método matricial de rigidez, dentro del rango lineal.

Debido a que el objetivo no es vender un producto, ya que es un trabajo de investigación académica, no se realizará análisis financiero. El alcance temporal abarcará al cuatrimestre QI 2018/2019.

CAPÍTULO II: ESTADO DEL CONOCIMIENTO

2.1. Acero inoxidable

2.1.1. Definición e historia

El acero inoxidable es la familia de aceros resistentes a la corrosión y a altas temperaturas. Con un contenido de cromo mayor al 10.5%, una superficie limpia y una exposición a un entorno oxidante, como el aire, se forma una capa de óxido rico en cromo sobre la superficie, la cual se repara instantáneamente en presencia de oxígeno si es dañada. [7]

Es un material relativamente moderno, la aleación se realizaba en 1821, pero fue hasta 1904 que se conoció que el carbono inhibe la protección frente a la corrosión. En 1929, se comenzó a utilizar en la construcción pero no en elementos estructurales. Las primeras construcciones que lo promovieron fueron el Edificio Chrysler (1930) y el Empire State Building (1931). Su uso se fue extendiendo a lo largo del tiempo, y hoy en día su precio es más accesible y ya no es considerado un lujo. [8]

Sus principales ventajas son:

- ✓ Resistencia a la corrosión
- ✓ Alto valor estético
- ✓ Resistencia al calor
- ✓ Bajo coste del ciclo de vida total
- ✓ Fácil fabricación y limpieza
- ✓ Elevado ratio resistencia/peso
- ✓ Fácilmente reciclable

2.1.2. Tipos de acero inoxidable

- 1) Aceros inoxidables austeníticos: Tienen mejor tenacidad que el acero al carbono para un amplio rango de temperaturas. Son los aceros inoxidables más utilizados en aplicaciones de edificación y construcción. [7]
- 2) Aceros inoxidables ferríticos: Son más económicos que los aceros inoxidables austeníticos y equivalentes en resistencia a la corrosión, pero en general son

menos dúctiles y menos soldables. Estos aceros se utilizan típicamente en ambientes interiores o exteriores con condiciones atmosféricas suaves. [7]

- 3) Aceros inoxidables dúplex (austenítico – ferrítico): Tienen una microestructura mixta entre austeníticos y ferríticos. Son más baratos que los aceros inoxidables austeníticos, y son dos veces más resistentes en la condición de recocido, lo que permite utilizar secciones transversales más pequeñas, aspecto que puede ser muy importante en aquellas estructuras en las que el peso juegue un papel importante, como puentes o estructuras offshore. [7]
- 4) Aceros inoxidables martensíticos: Pueden aumentar su resistencia mediante tratamiento térmico, gracias a su alto contenido en carbono. Son comúnmente utilizados en instrumentos quirúrgicos, cuchillos industriales, placas de apoyo y palas de turbina, debido a su resistencia al desgaste y a la abrasión. [7]
- 5) Aceros inoxidables endurecidos por precipitación: No se utilizan para fabricación soldada. Su resistencia a la corrosión es, en general, mejor que la de los aceros inoxidables martensíticos y similar a la de los aceros inoxidables austeníticos. A pesar de que son más utilizados en la industria aeroespacial, también pueden usarse para barras traccionadas, ejes, tornillos y otras aplicaciones que requieran alta resistencia y una resistencia a la corrosión moderada. [7]

2.1.3. Propiedades del acero inoxidable: Comportamiento tenso-deformacional básico.

Existen notables diferencias en el comportamiento tensión – deformación del acero inoxidable y del acero al carbono. La más importante reside en la forma de la curva. El acero al carbono, presenta un comportamiento lineal hasta su límite elástico y una zona plana antes del endurecimiento por deformación, mientras que el acero inoxidable, no contiene la zona plana, su curva es más redondeada y carece de un límite elástico claramente notable.

En la Figura 1, se pueden observar los distintos comportamientos tenso-deformacional tanto del acero al carbono, como de distintos tipos de acero inoxidable.

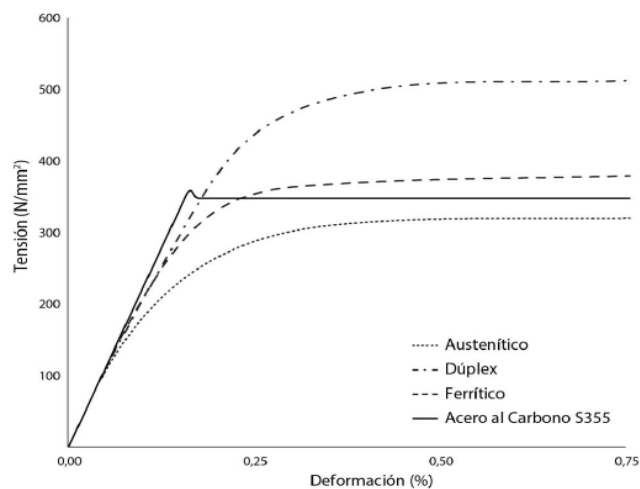
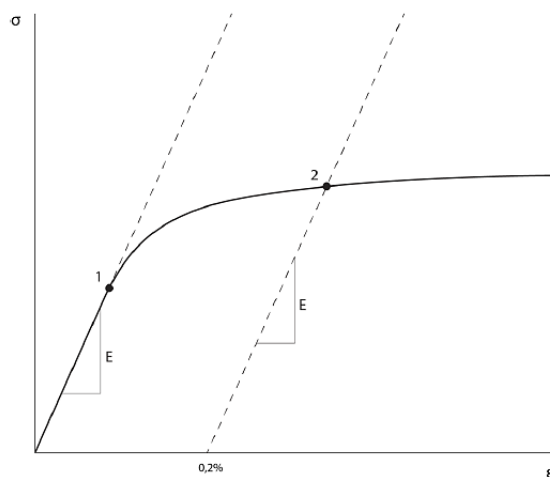


Figura 1. Curva tensión – deformación del acero inoxidable y del acero al carbono

Fuente: (EuroInox, 2017)

El “límite elástico” del acero inoxidable se expresa, en general, en términos de una resistencia de prueba definida para un determinado valor de deformación remanente (convencionalmente la deformación del 0,2%). En la Figura 2, se define la resistencia correspondiente a una deformación remanente del 0.2%, conocido también como el valor del límite elástico del 0.2%.



1. Límite elástico (de proporcionalidad)
2. Tensión correspondiente a una deformación remanente de 0,2%

Figura 2. Definición de la resistencia correspondiente a una deformación remanente de 0.2%

Fuente: (EuroInox, 2017)

2.1.4. Clasificación de las secciones transversales

Las secciones de acero inoxidable se clasifican de la misma manera que las de acero al carbono, es decir, existen cuatro clases que se describen a continuación [7].

- **Clase 1:** Secciones en las que se pueden formar rótulas, con la capacidad de rotación necesaria para un análisis plástico.
- **Clase 2:** secciones en las que se puede alcanzar el momento plástico, pero tienen capacidad de rotación limitada.
- **Clase 3:** Secciones en las que la tensión en la fibra más comprimida puede alcanzar el límite elástico, pero la sección abolla antes de alcanzar el momento plástico
- **Clase 4:** Secciones que abollan antes de alcanzar la tensión del límite elástico en una o más partes de la sección.

La clasificación de la sección depende de la clase más alta (menos favorable) de sus partes que la constituyen, que se encuentran parcial o totalmente comprimidas. Las normas [7] establecen límites para su clasificación y ésta puede variar dependiendo del esfuerzo axial y momento flector, por lo tanto, la clase puede ser diferente a lo largo del elemento.

2.1.5. Normativa aplicable

Actualmente, la normativa aplicable para este tipo de acero, en España y Europa es el Eurocódigo 3, "Proyectos de estructuras de acero" Parte 1-4. Reglas generales – Reglas adicionales para los Aceros Inoxidables" [9]. Esta normativa incluye factores que toman en cuenta las diferencias físicas y mecánicas entre el acero al carbón y el acero inoxidable.

Además, se cuenta con el "Manual de Diseño de Acero Inoxidable Estructural" [7] preparada por el Steel Construction Institute, cuya cuarta edición se publica el 2017. Este manual contiene dos partes útiles, la primera donde se especifican recomendaciones, y la segunda, donde se presentan ejemplos de cálculo.

2.1.6. Aplicaciones del acero inoxidable en la industria de la construcción

Los aceros inoxidables han sido utilizados en la construcción desde su invención, hace más de cien años. Los productos de acero inoxidable son de apariencia atractiva y

resistentes a la corrosión con bajos requisitos de mantenimiento, además de presentar buenas propiedades de resistencia, tenacidad y fatiga. Además, son totalmente reciclables al final de su vida útil.

Es un material muy útil en aplicaciones situadas en ambientes agresivos, incluyendo edificios y estructuras en zonas costeras, expuestas a sales de deshielo y en lugares contaminados. Por otro lado, poseen una alta ductilidad, lo que los hace especialmente adecuados para resistir cargas sísmicas, donde es necesaria una buena capacidad de disipación de energía [7].

Actualmente, existe una creciente conciencia de que a la hora de seleccionar un material, debe considerarse los costes durante todo su ciclo de vida (costes iniciales, mantenimiento, reciclado y duración) [7]. Desde este punto de vista, a pesar de que el coste de adquisición del acero inoxidable es más elevado que el del acero al carbón, por sus excelentes propiedades, puede implicar ahorros significativos a largo plazo.

2.1.7. Pórticos de acero inoxidable

De acuerdo a estudios previos que se realizaron en pórticos de acero inoxidable, se determinó que, el ignorar la no linealidad del material, puede producir una variación en los momentos del 25% [10].

Si se considera la no linealidad del material en el análisis global de un pórtico de acero inoxidable, se obtienen mayores deformaciones debido a la pérdida de rigidez. Sin considerar la plasticidad, los momentos son impredecibles [10].

Se define α_{cr} , como el factor por el cual, si se multiplica la carga de diseño, resulta una carga que provoca la inestabilidad global del pórtico, es decir, $\alpha_{cr} = P_{cr}/P$. A efectos de diseño de un pórtico de acero inoxidable, dentro de un análisis plástico, se puede llevar a cabo un análisis de primer orden cuando $\alpha_{cr} \geq 15$, y si $\alpha_{cr} < 15$, es necesario considerar análisis de segundo orden [10]. En el caso del acero al carbono, se pueden ignorar los efectos de segundo orden, cuando $\alpha_{cr} \geq 10$, en un análisis elástico, y $\alpha_{cr} \geq 15$, en un análisis plástico [9].

La no linealidad del material tiene una influencia directa en el comportamiento de las secciones, elementos y pórticos de acero inoxidable. Las secciones Clase 4, experimentan un pandeo local por debajo del 0.2% de tensión, mientras que las de Clase 1 a 3, llegan a endurecer con valores más allá del 0.2% de la tensión [11].

La no linealidad del acero inoxidable afecta en el comportamiento de pórticos de acero inoxidable, sin embargo, en la EN 1993-1-4, no se proporciona ninguna guía para tratar la no linealidad de la estructura en un análisis global. Debido a esta ausencia de guía, se han asumido análisis lineales aceptables para estos pórticos, pero estudios recientes han demostrado que este no es el caso [11].

La variación gradual de la rigidez, afecta en las características del sistema estructural, y consecuentemente, en las fuerzas internas y momentos. Si se considera la no linealidad del material, se presentan mayores deformaciones debido a la pérdida de rigidez, si se ignora la plasticidad, los momentos resultantes son subestimados. Por lo tanto, se recomendó que siempre se realice un análisis plástico en estructuras de acero inoxidable [11], considerando la no linealidad del material en un análisis global, ya que los pórticos de este material, son más susceptibles a los efectos de segundo orden [10].

2.1.8. Futuros estudios relacionados con el acero inoxidable

Actualmente, en diseños convencionales de estructuras de acero inoxidable, se utiliza un análisis elástico de primer orden, tratando a los elementos de manera individual como vigas, pilares y conexiones. Se ignora la distribución inelástica de cargas, requiere bastante tiempo y los cálculos son semi-empíricos para cada miembro del sistema [11].

Una propuesta alternativa, es desarrollar sistemas que consideren la no linealidad geométrica y del material como imperfecciones, capturando directamente las interacciones entre los componentes de la estructura, permitiendo la redistribución de esfuerzos y de este modo, reducir las verificaciones de diseño, ya que la inestabilidad ya se considera durante el análisis [11].

Si se explotan las herramientas 3D CAD o BIM (Building Information Modeling), se puede considerar un análisis a mayor detalle e integrado. Este enfoque es adecuado para aplicaciones de acero inoxidable, debido a su gran valor como material y su complejidad en su respuesta tensión-deformación para los métodos de análisis tradicionales [11].

Por otro lado, el acero inoxidable es un material asociado a impresiones metálicas en 3D. Estudios demuestran que se obtuvieron modelos impresos con gran exactitud geométrica, buena resistencia y un módulo de Young menor (alrededor de un 10%) [11].

2.2. Realidad virtual y aumentada

2.2.1. Antecedentes

La realidad virtual sirve para generar un entorno inmersivo, en el cual, el usuario vive una experiencia única dentro de lo que parece ser el mundo real [12]. El concepto de realidad virtual (VR), se conoce desde hace 50 años cuando se inventó el primer ordenador de interacción inmersiva con el ser humano, llamado “Man-Machine Graphical Communication System”. El término formal de Realidad Virtual se utiliza en 1989 [12].

Milgram [12], define cuatro niveles entre el mundo real y el virtual, de acuerdo a cuanto puede percibir el usuario en los sistemas electrónicos de visualización. Dichos niveles están representados en la Figura 3, donde se observa que en la transición del entorno real al virtual, se encuentra la realidad aumentada (AR), y el usuario tiene más contacto con la realidad que en la Virtualidad Aumentada (AV), donde se verían más elementos virtuales que reales, terminando en el entorno totalmente virtual (VE), a lo cual llamaremos Realidad Virtual.

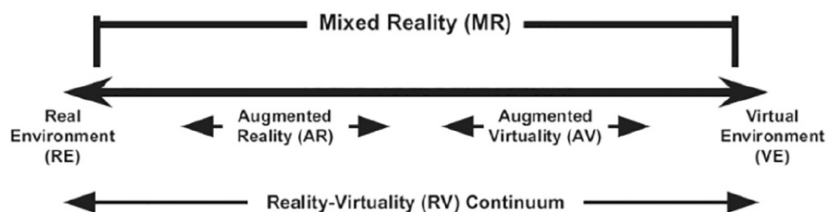


Figura 3. Niveles de transición entre el mundo real y virtual.
Fuente: (Li et al., 2018)

Por lo tanto, la Realidad Virtual (VR) reemplaza toda la percepción del usuario por un modelo 3D artificial generado en un ordenador. Se trata de generar un modelo que haga que el usuario tenga una sensación “real”. Sin embargo, el nivel de realismo siempre queda limitado, y hace falta sonorización para que exista una retroalimentación sensorial, desde el punto de vista cognitivo y sensitivo.

Por otro lado, la Realidad Aumentada (AR), integra imágenes generadas en el ordenador, dentro del mundo real, creando una escena aumentada. Esta tecnología satisface el objetivo de realzar la percepción de un prototipo virtual. Además, permite que el usuario este en contacto constante con la realidad, manteniendo la flexibilidad del mundo virtual.

Por lo tanto, la clasificación entre Realidad Virtual o aumentada se basa en cuánto desea observar el usuario del entorno real.

Hace dos décadas que se presta especial atención a las aplicaciones de realidad virtual y aumentada, las cuales están siendo muy utilizadas para aplicaciones en muchas áreas. Día a día, los desarrolladores de hardware y software, trabajan con grandes marcas, creando soluciones para los requerimientos de los clientes, más allá de solo una visualización en 3D. La sensación de inmersión es cada vez mayor, y el potencial de esta tecnología produce cambios importantes en la vida y actividades de los seres humanos. Estos cambios implican desde áreas y usos en educación, hasta ingeniería, arquitectura, urbanismo, arqueología, medicina, entretenimiento, seguridad industrial, entre otros.

En la Figura 4, se presenta una lista de algunos proveedores que han prestado interés en esta tecnología.

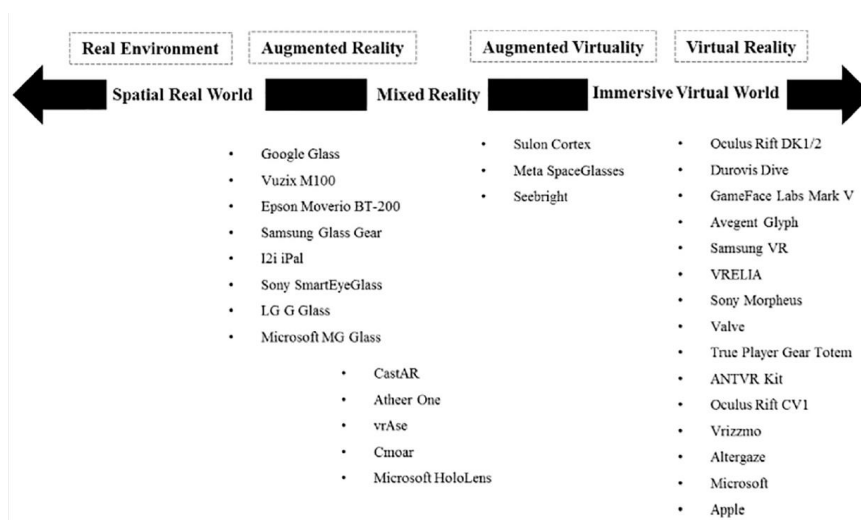


Figura 4. Proveedores de tecnología AR/VR

Fuente: (Li et al, 2018)

2.2.2. Realidad Virtual y Aumentada

Realidad virtual

Creando una sensación de realismo en una escala 1:1, esta tecnología provee un mejor entendimiento de un proyecto, y una comunicación más clara entre agentes que intervienen en su ejecución. [13]

Estudios previos mencionan que esta tecnología tiene el potencial de causar en el usuario la sensación de presencia, la cual se define como una experiencia subjetiva de estar en un lugar, cuando físicamente, se encuentra en otro [13].

Las primeras herramientas para la creación de aplicaciones de Realidad Virtual, fueron “SGI’s Iris Performer” y “Open Inventor” [14]. Actualmente, la más utilizada por su fuerte potencial es Unity.

La realidad virtual puede ser utilizada en la fase de operación de las construcciones, para un buen entendimiento del desarrollo de la obra. En el siguiente apartado, se explican algunos de los usos que se ha ido dando a la realidad virtual inmersiva, en el ámbito de la arquitectura, ingeniería y construcción.

Realidad aumentada

La realidad aumentada, integra imágenes tridimensionales de objetos virtuales dentro del mundo real. Hoy en día, está siendo muy estudiada ya que puede llegar a ser una herramienta útil en varios campos de aplicación. Al introducir elementos digitales en un mundo real, facilita el trabajo, acortando el tiempo de análisis, permite una mejor comprensión, y lleva al usuario a un entorno en el que puede percibir lo imperceptible en la realidad.

Esta tecnología promete ser una de las pioneras en un futuro, está siendo estudiada y utilizada desde campos como la medicina, el arte, el diseño, hasta la ingeniería.

Son muchos los estudios relacionados con la Realidad Aumentada dentro del ámbito de la construcción. En el este trabajo, se presentan los más relevantes, que resultan ser un material muy importante para avances futuros y para comprender el gran potencial que puede brindarnos esta tecnología.

2.2.3. Realidad Virtual y Aumentada en el sector AIC

El sector AIC (Arquitectura, Ingeniería y Construcción), se encuentra actualmente en una transición tecnológica, que implica el paso del papel al ordenador. Las tecnologías BIM, están siendo implementadas en los despachos de ingeniería, y se ha demostrado que permiten un trabajo colaborativo eficiente. Sin embargo, se pretende que el avance tecnológico no se quede solo en los despachos, sino que también llegue al pie de la obra. Es por eso que se ha estudiado la digitalización en la fase de ejecución de proyectos

constructivos [15], obteniendo resultados favorables, que permiten una mayor producción y menores costos, además, de ser una herramienta de fácil uso para cualquier agente dentro del proyecto.

En las últimas dos décadas, se ha estado utilizando mucho los sistemas de visualización inmersivos, en educación, campo médico, militar, industrial. Las industrias han estado pasando por la transición de adaptarse al uso de entornos virtuales. Durante el diseño de un proyecto, estas herramientas resultan efectivas y han sido utilizadas como colaboradoras en diseño e intercambio de información en un ambiente de equipo multidisciplinario [13].

Hoy en día, los sistemas computarizados son vitales durante todo el proceso constructivo de una obra. En las últimas décadas, se ha estado utilizando la realidad virtual y aumentada para propósitos comerciales, visualización de modelos BIM y en educación y capacitación de profesionales [13]. Sin embargo, no existe un estudio que se enfoque en una automatización o desarrollo de aplicaciones para el análisis estructural, y que provea un trabajo más eficiente al momento de calcular o diseñar una estructura.

Los entornos virtuales son considerados herramientas importantes en la educación y capacitación de profesionales que trabajan con modelos BIM. Además, han sido considerados instrumentos útiles para la capacitación en temas de seguridad industrial, y para que los estudiantes tengan un aprendizaje y comprensión eficiente de los procesos constructivos [13].

Los sistemas de realidad virtual y aumentada permiten visualizar e interactuar con datos a tiempo real, lo cual produce eficiencia y menor tiempo en la transferencia de información, para identificar problemas y facilitar el trabajo en equipo.

Se ha utilizado los modelos de realidad virtual para simular y visualizar las posibles interacciones del usuario, por ejemplo, la cantidad de consumo de energía, el comportamiento de las personas durante una situación de emergencia o evacuación, entre otros [13].

Realidad virtual y aumentada en la construcción y modelos BIM

Se han desarrollado diversas aplicaciones para el sector AIC que utilizan la Realidad Aumentada como herramienta de trabajo. Entre estos estudios se encuentran los que

son aplicados a la construcción [16], explorando su utilidad en la planificación de obra y visualización de modelos digitales.

Además, de estudios centrados en el uso de esta tecnología como medio de visualización de la información de modelos BIM [17]. Aplicación mediante la cual el usuario es capaz de inspeccionar la armadura de pilares en la obra.

Las herramientas inmersivas de realidad virtual, también resultan herramientas colaborativas en modelos BIM [18], que parten desde modelos arquitectónicos, estructurales y de instalaciones, generados en Revit y Ms Project, simulados en Navisworks o 3DS Max, y visualizados en Unity [19]. Generando un archivo para la ejecución en gafas que permiten la inmersión del usuario (ver Figura 5). Este sistema VR, nos permite identificar errores antes de llevar el modelo a la obra, como sucede en el caso de instalaciones.

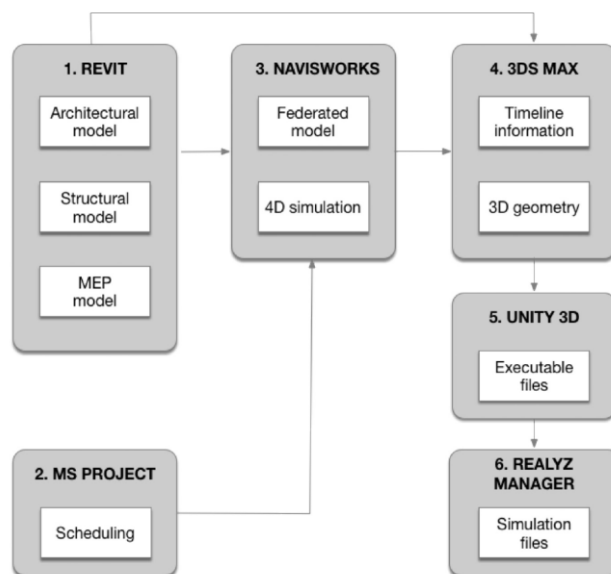


Figura 5. Generación de modelos de Realidad Virtual aplicados en BIM

Fuente: (Boton, 2018)

Estudios han demostrado que la realidad virtual tiene un gran potencial para mejorar la eficiencia del traspaso de información, facilitando su comprensión. El problema que se tenía era la falta de automatización, ya que para observar los datos actualizados se consumía un tiempo que podía ser reducido.

Sin embargo, la solución fue desarrollada mediante un sistema de sincronización automática llamado BVRS [20], en el cual se actualizan los datos a tiempo real utilizando una nube como plataforma. En este trabajo, el usuario actualiza un modelo BIM en Revit,

una nube organiza y transfiere los datos en formato IFC, que pueden ser visualizados con gafas de realidad virtual (Oculus Rift). El tiempo de actualización del modelo es de aproximadamente 10 segundos, lo que lo hace casi inmediato. El tiempo varía de acuerdo al número de elementos con los que cuenta el modelo en Revit, ya que efectúa un escaneo de todos para detectar los posibles cambios realizados, lo cual influye en el tiempo de sincronización.

Como se observa en la Figura 6, el usuario puede caminar dentro del modelo, y observar todos los elementos en un entorno cercano a la realidad. Esto facilita la coordinación, y comprensión entre diferentes agentes que trabajan en el proyecto, ya que no es necesario retirarse las gafas, para observar cualquier cambio inmediatamente.

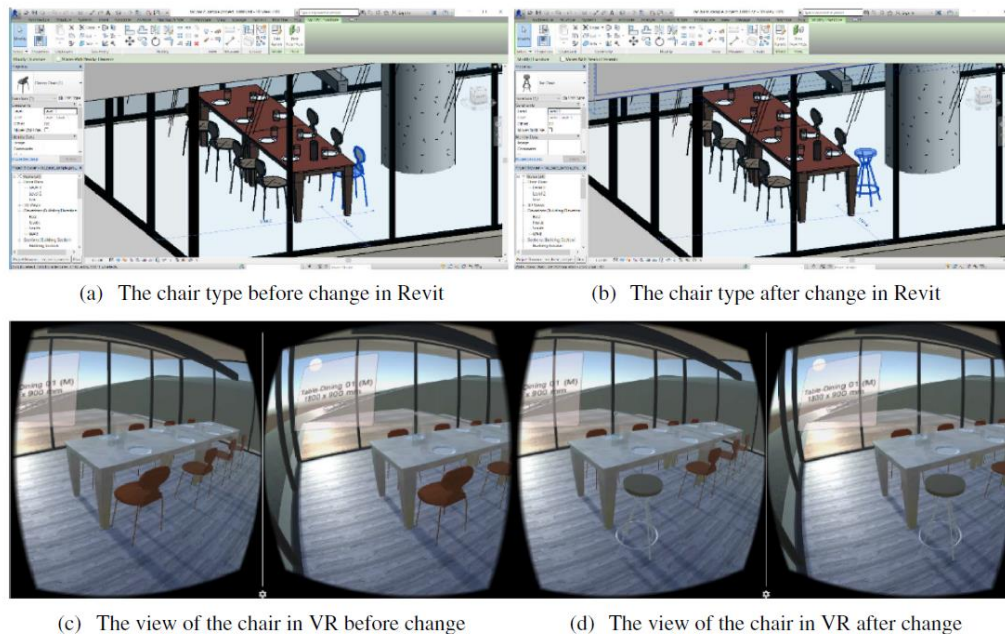


Figura 6. Ejemplo de cambios y visualización VR a tiempo real
Fuente: (Du et al., 2018)

Existen otros estudios acerca de la transmisión inmediata de datos en un modelo BIM, que demuestran que, la clave está en el manejo de información a través de modelos IFC (Industry Foundation Classes) junto con el formato ligero JSON (JavaScript Object Notation). Este último, tiene una mayor eficiencia de “parsing” (análisis de los datos tipo string, para poder separarlos) que un formato XML y ha sido mucho más utilizado en aplicaciones web. Se introduce un esquema de manejo de datos ifcJSON [21], donde los datos del modelo IFC se manejan en formato JSON, el cual puede ser transferido vía web, en lugar de documentos XML, pudiendo alcanzar una transferencia de datos inmediata en modelos BIM.

Realidad virtual y aumentada en la educación y seguridad

Últimamente, se presta especial atención al desarrollo de aplicaciones para su uso en educación y seguridad. En estudios previos relacionados a la seguridad en la construcción, se ha detectado que los usuarios identifican mayores niveles de riesgo y peligros dentro del mundo virtual, que mediante estudios tradicionales con elementos de fotografía y documentos [12]. Mediante los sistemas de realidad virtual y aumentada, se experimenta una retroalimentación inmediata, y por ende, un aprendizaje más eficiente.

Los sistemas computarizados cada vez son más populares en el área académica de la construcción, debido a que permiten un aprendizaje cognitivo. Los sistemas de realidad virtual y aumentada, permiten alcanzar grandes oportunidades de aprendizaje con un nivel alto y menor peligro [12].

Se han desarrollado aplicaciones VR, como un “Serious Game” inmersivo, que favorece en la asimilación de conceptos acerca de Prevención de Riesgos Laborales (PRL) [22]. Los resultados de estos estudios demuestran que el usuario vive una experiencia personal e implicación sensorial/emocional, que le permite adquirir una experiencia formativa mucho más estimulante y práctica.

Realidad virtual en arquitectura

En el diseño arquitectónico, los sistemas de realidad virtual inmersivos, se consideran una estrategia ventajosa. Se han realizado estudios comparativos entre una percepción de un modelo virtual tradicional y uno inmersivo. Estos estudios concluyen que mediante un entorno inmersivo, se alcanzan mejores niveles de entendimiento de la disposición de los espacios del modelo virtual [23].

Realidad virtual en CAD

Esta tecnología también ha sido estudiada en la visualización de modelos CAD [14]. En la Figura 7, se puede observar el proceso de un modelo CAD, a un modelo VR, pasando por un paquete de renderización.

Se utilizó una librería, en la cual se realiza la transferencia de datos mediante el formato DXF de AutoCAD. Se utilizó Open Inventor, que contiene un formato VRML (Virtual Reality Modelling Language), en los que los modelos CAD son exportados para su visualización [14]. Aunque este sistema aun no es comercial, se esperan grandes avances en el uso de modelos CAD visualizados en VR.

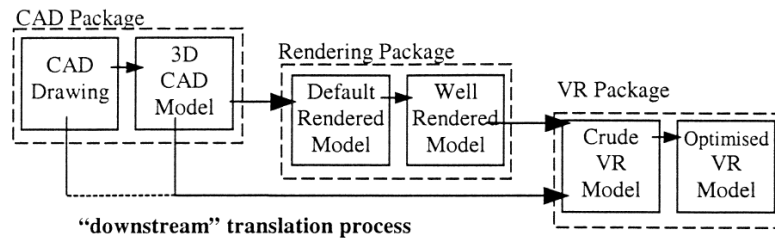


Figura 7. Proceso de transformación de CAD a VR

Fuente: (Whyte et al., 2000)

Realidad virtual en análisis estructural

En cuanto a cálculo y análisis estructural, se ha estudiado la posibilidad de generar modelos de realidad virtual que reemplacen a los programas de análisis convencionales. Un estudio ha desarrollado un modelo que permite visualizar cerchas mediante un algoritmo que permite interacción a tiempo real [24].

Los objetos se simulan de manera independiente en VR, y se complementan mediante modelos interactivos. El método simula el comportamiento de cerchas en dos dimensiones, de forma estática y dinámica, utilizando los lenguajes VRML97 y JavaScript, en ordenador y gafas VR de bajo coste.

Realidad virtual en puentes

Se han desarrollado aplicaciones que permiten capacitar acerca de los procesos constructivos, específicamente en puentes. Uno de estos estudios, demuestra a través de ejemplos, que la realidad virtual es una herramienta tecnológica muy beneficiosa para la educación [25]. Los estudiantes interactúan con modelos virtuales de manera que pueden ver todo el proceso constructivo, identificar el método aplicado y analizarlo al detalle. Por lo tanto, es claro que el introducir tecnología como la realidad virtual, es un material que debe ser conocido y aplicado en las universidades para el aprendizaje.

En la Figura 8 se citan los programas utilizados para la generación de estos modelos de realidad virtual. En la Figura 9, se pueden observar algunas imágenes de la visualización en VR del proceso constructivo del puente.

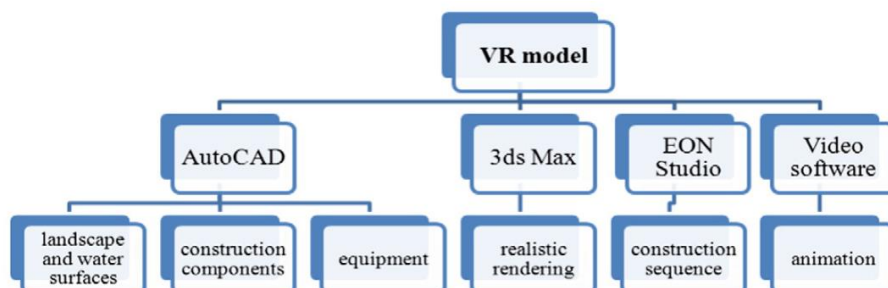


Figura 8. Software utilizado en sistemas VR en proceso constructivo de puentes
Fuente: (Sampaio & Martins, 2014)



Figura 9. Visualización del proceso constructivo de un puente en VR.
Fuente: (Sampaio & Martins, 2014)

Se han mencionado muchos ejemplos en los que ha sido y está siendo utilizada la tecnología de Realidad Virtual. Muchos de ellos, aplicados para la educación, otros para el área de la ingeniería y otros en el área administrativa o de interacción de agentes en la construcción.

Se ha visto que esta tecnología es de gran utilidad y pretende alcanzar niveles muy altos como herramienta de trabajo y aprendizaje en distintos aspectos, aportando una gran eficiencia en el trabajo de las personas, tanto de manera personal, como grupal.

Realidad aumentada en instalación de tuberías

Al introducir elementos digitales dentro de un mundo real, la Realidad Aumentada (AR) puede beneficiar a los trabajadores en instalación de tuberías, de manera que logren un trabajo adecuado, en menor tiempo y con errores reducidos. Un estudio basado en un prototipo desarrollado [26] , ha demostrado que, utilizando una visualización AR en lugar de un modelo isométrico en 2D, el tiempo y los errores reducen al 50%, y por ende,

los costos que esto conlleva. La Realidad Aumentada también permite ahorrar 2/3 del costo de corrección de errores de ensamblaje a causa de un mal entendimiento de los dibujos en 2D.

Por lo tanto, se ha demostrado que reduce considerablemente la carga cognitiva de trabajo. En la Figura 10, se compara la visualización de un dibujo isométrico en 2D (a) versus una visualización mediante un sistema AR (b). Se puede observar claramente, que mediante el sistema AR, la comprensión logra ser mucho más rápida.

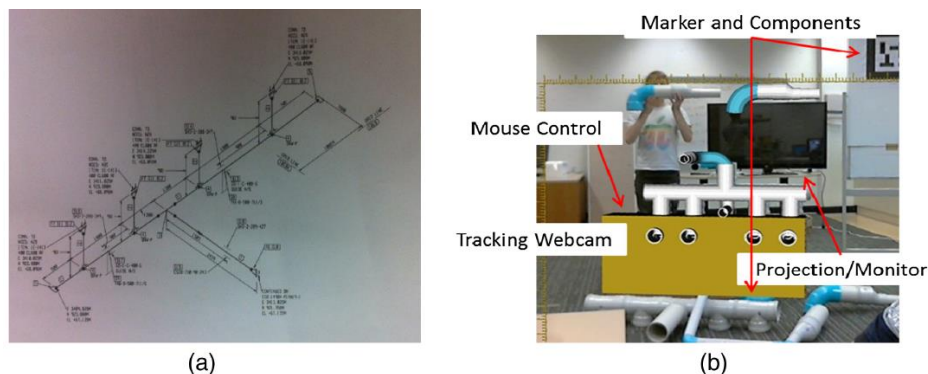


Figura 10. Modelo isométrico 2D (a) vs. modelo sistema AR (b)

Fuente: (Hou et al., 2015)

Realidad aumentada en reuniones para la toma de decisiones y solución de un problema en equipo

En cuanto al BIM, existe un estudio realizado en el uso de AR en discusiones y toma de decisiones de un equipo de trabajo del área de la construcción [27]. Es claro que durante el transcurso de una obra, la toma de decisiones lleva un tiempo considerable, que se traduce en un costo del proyecto. En este estudio, se utiliza la herramienta de Realidad Aumentada en discusiones, toma de decisiones y resolución de problemas de un equipo.

La Realidad Aumentada es una tecnología que provee información adicional dentro del mundo real. En este sentido, se ha desarrollado un sistema de realidad aumentada y pantalla múltiple, llamado AR-MS [27], que consiste en que cada agente que interviene en la reunión, a través de un teléfono móvil o tableta, provee la información privada que desee en una mesa BIM, donde se observa toda la información pública compartida por todos los agentes.

La mesa BIM, crea un ambiente in-situ, con información pública, mientras que la información privada se mantiene en el dispositivo de cada agente (ver Figura 11).

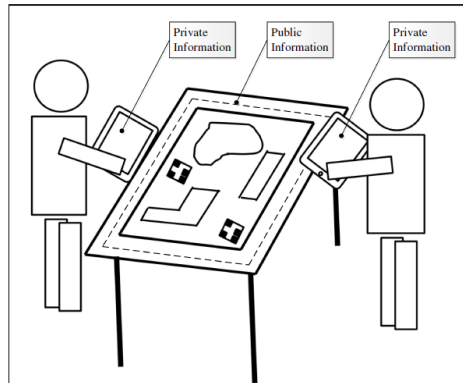


Figura 11. Interacción de los agentes participantes en una mesa BIM

Fuente: (Lin et al., 2015)

El sistema se ha desarrollado utilizando el Software Unity 3D y la plataforma de procesamiento de datos Vuforia, que es la responsable de mostrar la información en la mesa BIM. Se eligió esta plataforma ya que es muy estable con las aplicaciones para Android desarrolladas en Unity.

Los resultados de este estudio demuestran que, el tiempo en que los agentes que intervienen en el problema encuentran datos y soluciones, reduce notablemente comparado con un sistema de reunión tradicional mediante lápiz y papel. Como resultado, los profesionales pueden aprovechar esta herramienta y mejorar su eficiencia de las decisiones que tomen en el transcurso de un proyecto.

Realidad Aumentada en plan de estudios de Ingeniería Civil

Existe una aplicación de realidad aumentada desarrollada para un estudio en la educación de la ingeniería civil, llamada CAM-ART [28]. En este estudio, se pone a prueba a estudiantes que utilizan dicha aplicación para el aprendizaje, la cual muestra contenido multimedia virtual (sonido, videos, imágenes, gráficos, etc.), sobre el libro físico, como se observa en la Figura 12.

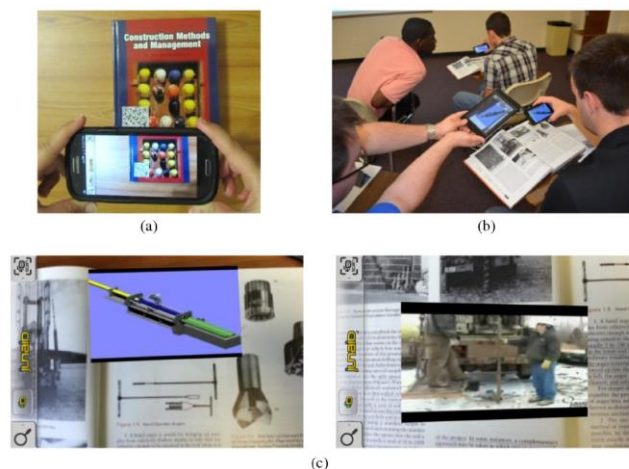


Figura 12. CAM-ART, sistema AR aplicada en estudiantes de ingeniería civil.
Fuente: (Shirazi et al., 2015)

Esta aplicación rompe la barrera entre los estudiantes y la tecnología en la educación, permite que ellos estén inmersos en un ambiente multimedia de aprendizaje, que provoca una interacción más profunda entre los estudiantes y sus lecciones. Esta aplicación, pretende ser mejorada implementando juegos que permitan que los estudiantes aprendan experiencias del mundo real, con escenarios y problemas reales, que la realidad aumentada puede proporcionar.

Realidad aumentada en la inspección durante la construcción de túneles

Los sistemas de Realidad Aumentada, también pueden ser utilizados en procesos constructivos, como en inspección de la obra.

Se ha estudiado el uso de la Realidad Aumentada [29] (Figura 13), para verificar los desplazamientos que se presentan en la construcción del túnel, utilizarlos para verificar los estándares de calidad, evaluar la seguridad, y comparar los resultados con los métodos tradicionales (Figura 14).

El método consiste en los siguientes pasos:

- ✓ El inspector in-situ, realiza un plan de acuerdo a los estándares de calidad.
- ✓ El modelador BIM, transmite los modelos al inspector, de manera que los almacene en el sistema de realidad aumentada.
- ✓ Estos modelos, se consideran los modelos base.

- ✓ Se generan marcadores de acuerdo a los modelos base en un programa generador de marcadores.
- ✓ Los trabajadores in-situ aplican estos marcadores en la localización respectiva.
- ✓ Los modeladores BIM o los trabajadores in-situ, utilizan la aplicación de realidad aumentada, la cual puede ser visualizada desde unas gafas o desde un dispositivo inteligente.
- ✓ Se comparan las imágenes actuales con el modelo base, de manera que los inspectores realicen un análisis y evaluación del estado del túnel, de acuerdo a estas comparaciones.
- ✓ Posteriormente, deberá informar los resultados a los demás agentes que intervienen en la construcción.



Figura 13. Inspección con AR
Fuente: (Zhou et al., 2017)



Figura 14. Inspección tradicional de desplazamientos
Fuente: (Zhou et al., 2017)

Los resultados de este trabajo demostraron que, tanto el método tradicional de medición manual, como el de realidad aumentada, proporcionan resultados aceptables para la evaluación de los desplazamientos. A pesar de que el método convencional necesita menos configuraciones previas, el sistema de realidad aumentada, reduce el tiempo de inspección total, como se observa en la Figura 15.

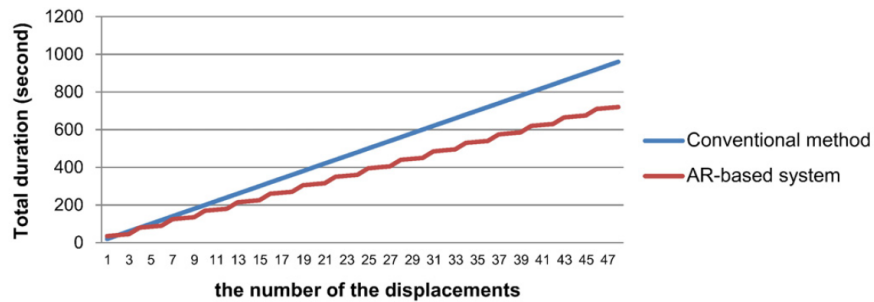


Figura 15. Duración de inspección con método tradicional y con sistema AR
Fuente: (Zhou et al., 2017)

Mediante el uso de la realidad aumentada, la inspección de los desplazamientos y el análisis pueden realizarse in-situ, a tiempo real y con un bajo costo. De modo que resulta ser un método más práctico y eficiente que los tradicionales. Esta tecnología es un avance importante en el desarrollo tecnológico para aplicaciones en construcción, y pretende mejorar, automatizando el proceso y ampliando sus limitaciones.

Como se ha visto con los ejemplos anteriores, existen diversas aplicaciones de los sistemas de Realidad Aumentada en distintos campos de la ingeniería civil, desde el campo profesional hasta el académico.

Esta tecnología se encuentra en constante desarrollo y se establece como una herramienta importante, que además de facilitar el aprendizaje y comprensión de manera eficiente, facilita el trabajo en el área profesional. Es una herramienta que sin alejarnos de la realidad, nos permite percibir el entorno desde otra perspectiva, y nos pone en contacto con elementos virtuales que se adaptan al entorno real y parecen ser reales.

CAPÍTULO III: CONCEPTOS ESTRUCTURALES

3.1. Introducción

Las aplicaciones de Realidad Virtual y Aumentada desarrolladas en el presente proyecto, al ser implementadas en ensayos de laboratorio de estructuras de acero inoxidable, requieren formulación matemática para modelar su comportamiento.

A continuación, se explican las bases matemáticas estudiadas para el desarrollo del proyecto. Las aplicaciones VR de vigas y pilares, se basan en las ecuaciones de la elástica, y la aplicación AR de pórticos, en el método matricial de rigidez.

3.2. Bases matemáticas para las estructuras estudiadas

3.2.1. Análisis estructural vigas

La aplicación VR desarrollada, de acuerdo al ensayo en el que será implementada, se basa en un modelo de viga simplemente apoyada, que se ensaya bajo dos cargas verticales equidistantes (ver Figura 16), y requiere de una formulación que permita describir su forma, a partir de un dato leído, (deformación máxima experimentada).

Debido a que el principal objetivo de la aplicación de Realidad Virtual en los ensayos de vigas es un entorno visual, enfocado a percibir el estado del ensayo desde otro sitio, y tomando en cuenta que el programa que realiza el cálculo es el mismo que el de visualización, se estimó la flecha mediante ecuaciones lineales clásicas.

La flecha en vigas de acero inoxidable, en las cuales no se forman rotulas plásticas, puede ser estimada mediante la teoría clásica de análisis estructural, exceptuando que debe utilizarse el modulo secante en lugar del módulo de Young. [7]

A continuación se plantea para el problema de la viga de acero inoxidable, las ecuaciones de la elástica, en base a sus condiciones de apoyo y de cargas aplicadas.

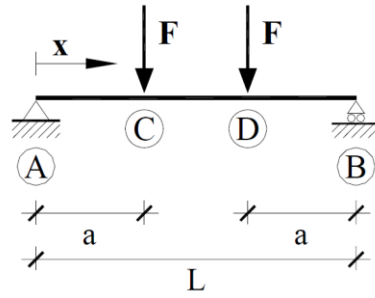


Figura 16. Esquema viga analizada

Fuente: Elaboración propia

Debido a que se realiza un análisis lineal, donde el módulo de elasticidad (E) tiene un valor constante, esta variable sale de la integral, por lo que la ecuación de la elástica para el tramo AC resulta ser:

$$y_{AC} = \frac{Fx}{6EI} (3aL - 3a^2 - x^2) \quad \text{Ec-1}$$

Y para el tramo CD:

$$y_{CD} = \frac{Fa}{6EI} (3Lx - 3x^2 - a^2) \quad \text{Ec-2}$$

Siendo la flecha máxima en $x=L/2$:

$$y_{max} = \delta = \frac{Fa}{24EI} (3L^2 - 4a^2) \quad \text{Ec-3}$$

Despejando la fuerza F de la Ec-3, se tiene:

$$F = \frac{24EI\delta}{a(3L^2 - 4a^2)} \quad \text{Ec-4}$$

Reemplazando Ec-4 en Ec-1 y Ec-2:

$$y_{AC} = 4\delta x \frac{(3aL - 3a^2 - x^2)}{(3aL^2 - 4a^3)} \quad \text{Ec-5}$$

$$y_{CD} = 4\delta \frac{(3Lx - 3x^2 - a^2)}{(3L^2 - 4a^2)} \quad \text{Ec-6}$$

Las ecuaciones 5 y 6, son las utilizadas en el programa Unity. Nos permiten modelar la viga a partir de la deformación máxima (δ) leída por el sensor, y actualizada a tiempo real.

3.2.2. Análisis estructural pilar

Al igual que en el caso interior, la aplicación VR desarrollada, pretende modelar el comportamiento del pilar en base a la deformada máxima leída del ensayo. Debido a las condiciones de montaje, se supondrá un pilar con apoyos articulados en los extremos, es decir, que el giro sea permitido.

Para establecer la ecuación de la deformada, se supone una pieza ideal comprimida, en la que si no hay carga transversal o que produzca flexión[30]:

$$EIz''(x) + Nz(x) = 0$$

Siendo:

$$k^2 = \frac{N}{EI}$$

$$z''(x) + k^2z(x) = 0$$

La solución general de la ecuación diferencial es:

$$z_{(x)} = A\cos(kx) + B\sin(kx)$$

Estableciendo las condiciones de contorno:

$$y(0) = 0 \rightarrow A = 0$$

$$y(L) = 0 \rightarrow B\sin(kL) = 0$$

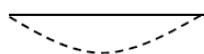
$$B \neq 0 \rightarrow \sin(kL) = 0$$

Esto ocurre cuando:

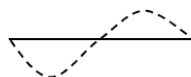
$$kL = n\pi \rightarrow k = \frac{n\pi}{L}$$

Por lo tanto:

$$z_{(x)} = B\sin\left(\frac{n\pi}{L}x\right), \text{ para } n = 1, 2, 3 \dots$$



$n = 1$



$n = 2$

Se adopta el primer caso, por lo que se tiene:

$$z_{(x)} = B \operatorname{Sen} \left(\frac{\pi}{L} x \right)$$

Tomando en cuenta que el desplazamiento máximo se dará en el centro del pilar, se tiene:

$$z_{\max} = B \operatorname{Sen} \left(\frac{\pi}{L} * \frac{L}{2} \right)$$

$$z_{\max} = B \operatorname{Sen} \left(\frac{\pi}{2} \right)$$

$$z_{\max} = B$$

Por lo tanto, la ecuación de la elástica de este tipo de pilar, en función de la posición a lo largo del pilar y del desplazamiento máximo, está dada por:

$$z_{(x)} = z_{\max} * \operatorname{Sen} \left(\frac{\pi}{L} x \right)$$

Ésta última ecuación es introducida en el código del programa Unity, para dibujar el elemento pilar en el entorno virtual, en base a la deformación máxima leída con el uso de un sensor, y actualizada a tiempo real.

3.2.3. Análisis estructural pórticos

En el caso de la aplicación AR para el ensayo del pórtico de acero inoxidable, considerando la tipología y montaje del ensayo, se resuelve el pórtico como una estructura de barras por el método matricial dentro del rango lineal.

Entre las ventajas del método matricial se encuentran:

- ✓ Permite utilizar métodos de cálculo de una forma más compacta, precisa y general. Donde los principios fundamentales no se ven oscurecidos por las diferencias geométricas u operaciones de cálculo. [31]
- ✓ Proporciona en la práctica un sistema adecuado de análisis y determina las bases para el desarrollo de programas en ordenador. [31]

Asumiendo un comportamiento lineal, donde el valor del módulo de elasticidad (E) es constante, se adopta como válido el principio de superposición. Por lo tanto, si se definen dos estados de carga, el desplazamiento total será igual a la suma de los desplazamientos de cada estado.

Para resolver una estructura mediante el método de rigidez matricial, se deben seguir los siguientes pasos, ilustrados en la Figura 17.

1. Definir la geometría e la estructura, acciones y condiciones de apoyo.
2. Numerar los nodos y barras que la componen e identificar las condiciones de compatibilidad de los nudos.
3. Identificar el número de desplazamientos desconocidos que determinan la deformación de la estructura.
4. Resolver las barras individualmente, de acuerdo a condiciones de equilibrio y compatibilidad. Asignar las cargas sobre nodos.
5. Resolver la estructura globalmente, obteniendo como resultado los desplazamientos desconocidos.
6. Determinar las reacciones en la estructura.
7. Determinar los esfuerzos en las barras.

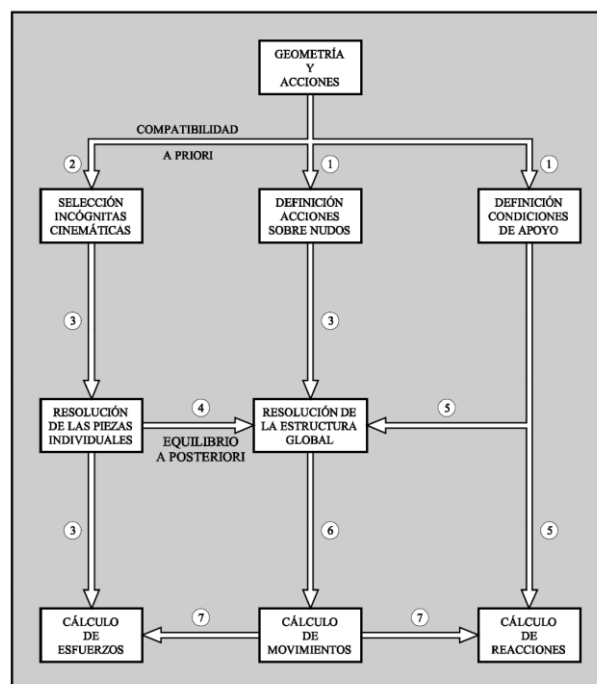


Figura 17. Secuencia de cálculo del método de rigidez
Fuente: (Hurtado, n.d.)

El número de desplazamientos desconocidos está dado por:

$$No. desplazamientos desconocidos = GL * n - CA$$

Donde:

GL = Número de grados de libertad

n = número de nudos de la estructura

CA = número de grados de libertad prescritos por las condiciones de apoyo

La matriz de rigidez de cada pieza comprende las ecuaciones elásticas de cada pieza. El plantear las ecuaciones de equilibrio de los nodos, se denomina “ensamblaje de la matriz de rigidez global”. Al imponer las condiciones de apoyo, se determinan las reacciones en los mismos.

A continuación se describe con mayor detalle el proceso del método de rigidez.

✓ **Definición geométrica de la estructura**

En primer lugar, es importante definir las secciones que componen las barras de la estructura, determinar sus características geométricas (área, inercia) y mecánicas (módulo de Young).

A su vez, se debe definir las características de la estructura, longitudes, posición de las cargas, condiciones de apoyo.

Se determina el número de incógnitas del problema, considerando los grados de libertad de la estructura. Posteriormente, se debe numerar los nudos y las barras en base al sistema global de coordenadas, esta numeración puede incidir en el tamaño de la matriz de rigidez, por lo que es recomendable, numerar primeramente los nudos con desplazamientos conocidos, como los que contienen las condiciones de apoyo, seguido de los nudos cuyo desplazamiento es desconocido.

✓ **Obtención de la matriz de rigidez local de cada elemento**

Como siguiente paso, se determina la matriz de rigidez de cada elemento. Se debe considerar la numeración planteada, tomando en cuenta el número inferior como nudo inicial (a), y el superior como nudo final (b).

Las matrices de rigidez están dadas por:

$$\mathbf{K}'_{aa} = \begin{bmatrix} +\frac{EA}{l} & 0 & 0 \\ 0 & +\frac{12EI}{l^3} & +\frac{6EI}{l^2} \\ 0 & +\frac{6EI}{l^2} & +\frac{4EI}{l} \end{bmatrix} \quad \mathbf{K}'_{ab} = \begin{bmatrix} -\frac{EA}{l} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{12EI}{l^3} & +\frac{6EI}{l^2} \\ 0 & -\frac{6EI}{l^2} & +\frac{2EI}{l} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{K}'_{ba} = \begin{bmatrix} -\frac{EA}{l} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{12EI}{l^3} & -\frac{6EI}{l^2} \\ 0 & +\frac{6EI}{l^2} & +\frac{2EI}{l} \end{bmatrix} \quad \mathbf{K}'_{bb} = \begin{bmatrix} +\frac{EA}{l} & 0 & 0 \\ 0 & +\frac{12EI}{l^3} & -\frac{6EI}{l^2} \\ 0 & -\frac{6EI}{l^2} & +\frac{4EI}{l} \end{bmatrix}$$

Y las ecuaciones de cada elemento son:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{f}'_a \\ \mathbf{f}'_b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{K}'_{aa} & \mathbf{K}'_{ab} \\ \mathbf{K}'_{ba} & \mathbf{K}'_{bb} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{d}'_a \\ \mathbf{d}'_b \end{bmatrix}$$

Donde los vectores que la componen contienen:

$$\mathbf{f}'_a = \begin{bmatrix} F'_{xa} \\ F'_{ya} \\ M'_a \end{bmatrix} \quad \mathbf{f}'_b = \begin{bmatrix} F'_{xb} \\ F'_{yb} \\ M'_b \end{bmatrix} \quad \mathbf{d}'_a = \begin{bmatrix} u'_a \\ v'_a \\ \phi'_a \end{bmatrix} \quad \mathbf{d}'_b = \begin{bmatrix} u'_b \\ v'_b \\ \phi'_b \end{bmatrix}$$

✓ Transformación del sistema de coordenadas

En todas las ecuaciones anteriores, se considera cada elemento aislado, es decir, en base a un sistema local. Por lo que el siguiente paso, es convertir la matriz de rigidez a un sistema global (ver Figura 18), para lo cual se debe determinar la matriz de rotación de cada elemento.

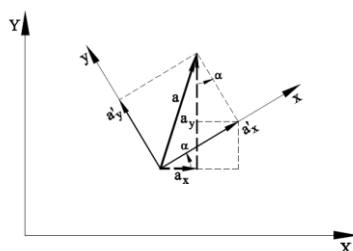


Figura 18. Transformación de sistema de referencia
Fuente: (Hurtado, n.d.)

Matriz de rotación:

$$\begin{bmatrix} \cos \alpha & -\sin \alpha & 0 \\ \sin \alpha & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Con la cual, la rotación está dada por:

$$\mathbf{a}' = \mathbf{T}^T \mathbf{a}$$

✓ **Ensamblaje de la matriz de rigidez global.**

Una vez que se cuenta con las matrices de rigidez en el sistema global de cada elemento, se debe ensamblar la matriz de toda la estructura. Es en este punto donde la numeración de los nodos tiene influencia. Si se ha considerado numerar primeramente los nudos con desplazamientos conocidos, la matriz de rigidez con valores no nulos se concentra en la franja central de la diagonal, como se observa en la Figura 19.

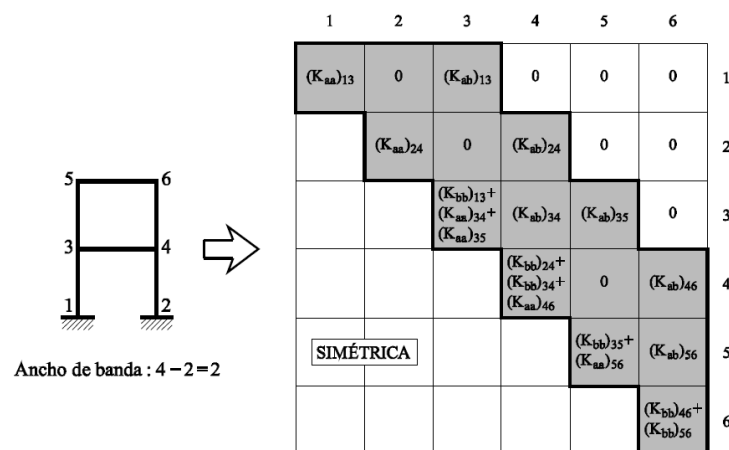


Figura 19. Numeración de nodos y estructura de la matriz de rigidez global
Fuente: (Hurtado, n.d.)

Dicho ensamblaje se realiza considerando el equilibrio de fuerzas de cada nudo. La nueva matriz es simétrica y singular, ya que las ecuaciones de equilibrio no son afectadas por un movimiento de sólido rígido de la estructura. El sistema tiene solución, ya que se conocen ciertos desplazamientos en los apoyos, y las fuerzas aplicadas en los nudos.

✓ **Cargas actuantes sobre los elementos.**

Para resolver el sistema de ecuaciones que dará solución a la estructura ($F = K \cdot d$), es importante definir el vector de fuerzas, el cual será el correspondiente a la resolución

independiente de cada elemento, cargando sus reacciones en los nudos, considerando la rigidez adecuada de los extremos de las barras.

✓ Resolución del sistema

Una vez que se tiene la matriz de rigidez de toda la estructura, el vector de desplazamientos desconocidos y el vector de fuerzas conocidas de cada nudo de las barras, y considerando los grados de libertad adecuados, es posible resolver el sistema:

$$F = K * d$$

Donde:

$$d = K^{-1} * F$$

Con los desplazamientos desconocidos, es posible calcular las reacciones de la estructura y los esfuerzos en cada barra, convirtiendo el sistema nuevamente a ejes locales por medio de la matriz de rotación.

CAPÍTULO IV: SISTEMAS DESARROLLADOS

4.1. Diseño de los sistemas

4.1.1. Sistema de Realidad virtual

En base a los conceptos descritos anteriormente, se desarrollaron dos aplicaciones de Realidad Virtual, para su uso en ensayos de laboratorio de estructuras de sección hueca, de acero inoxidable. La primera es aplicada a ensayos en vigas, y la segunda en pilares. En ambos casos, el diseño del sistema se basa en la arquitectura de la Figura 20.

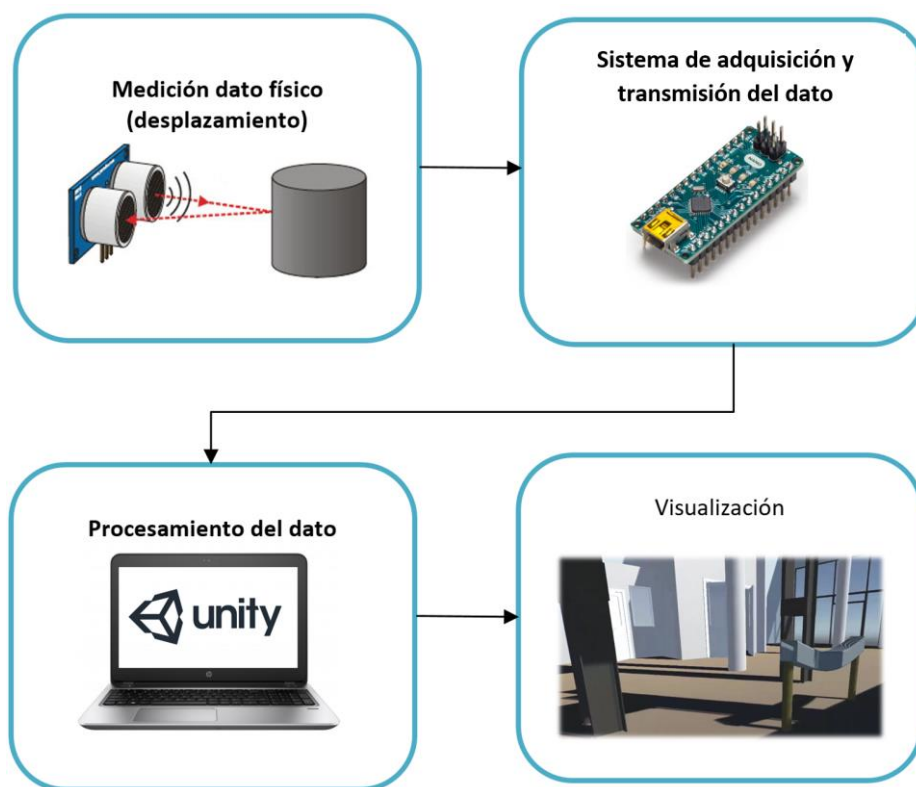


Figura 20. Arquitectura sistema Realidad Virtual

Fuente: Elaboración propia

En primer lugar, se realiza la toma del dato utilizando un sensor de ultrasonido HC-SR04, el cual medirá la distancia desde su posición hasta la superficie más cercana, en este caso, el punto donde se quiere medir el desplazamiento.

Para asegurar que la distancia proporcionada por el sensor sea correcta, se realizó la respectiva calibración y verificación previa de los datos, adoptando una medida conocida y comparándola con la de la lectura, hasta que los valores coincidan.

Esta distancia, la cual es enviada en términos de tiempo, es procesada por una placa Arduino Nano, en la cual se cargó el código, que se encarga de leer y realizar el procesamiento (obtención de la distancia en centímetros) y envío del dato al ordenador. Si se calcula la diferencia entre la distancia medida en el momento deseado, y la distancia inicial al sensor, se obtiene el desplazamiento de este punto a tiempo real.

Se adoptó un intervalo de tiempo de lectura de 20 milisegundos dentro del código de Arduino, el cual se consideró adecuado para la correcta visualización, luego de realizar varias pruebas.

La conexión del sensor con la placa, y ésta con el ordenador, se muestra en la Figura 21 y Figura 22. El sensor tiene una conexión a 5V, a tierra, y dos a diferentes pines digitales de la placa, la cual se conecta al ordenador mediante un cable USB, para que este le proporcione energía, y cargue el correspondiente código elaborado en la plataforma de Arduino.

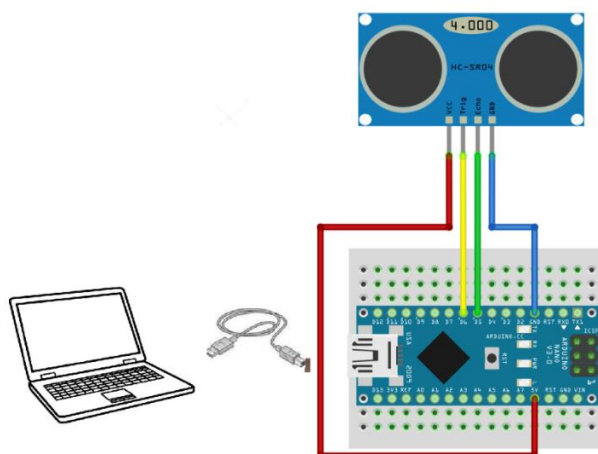


Figura 21. Montaje del sistema electrónico para toma de dato con placa Arduino
Fuente: Elaboración propia

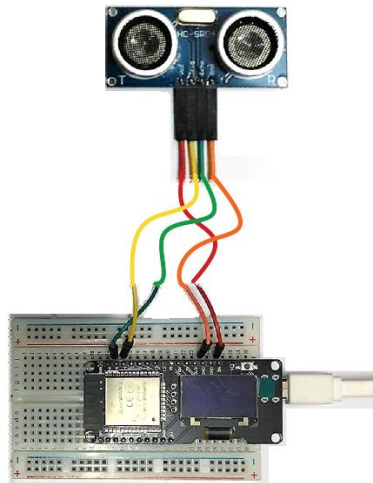


Figura 22. *Conexión sensor con placa ESP32*
Fuente: Elaboración propia

Una vez que se obtiene la distancia medida, el código en Unity (desarrollado en Visual Studio), se encarga de leer el dato, calcular el desplazamiento a tiempo real del punto fijado en el ensayo, y simular la forma de la viga y pilar. Éste código debe ser cargado a un objeto en Unity, en este caso la fracción de elemento.

Este proceso es realizado mediante las ecuaciones de la elástica del elemento viga y pilar, los cuales son discretizados en varios elementos, como el que se muestra en la Figura 23. Al ir cambiando las coordenadas de cada elemento, el usuario visualiza un comportamiento global similar al de la realidad.

Si estos elementos se modelan directamente como objetos “hijos” en Unity, al tratarse de un gran número a dibujar, la aplicación experimenta un retraso considerable. Es por eso, que fueron modelados en el programa Revit, importándolos en Unity como un solo objeto (Figura 23), de manera que no afecte en el tiempo de procesamiento del ordenador. Además, desde el punto de vista estético, conservan una forma más real. En el apartado 4.4.3, se explican con más a detalle los conceptos necesarios para el desarrollo de aplicaciones en Unity.

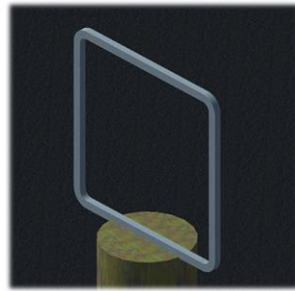


Figura 23. *Elemento discretizado modelado en Revit*
Fuente: Elaboración propia

En cuanto al entorno que se visualiza, éste corresponde al propio laboratorio de estructuras de la Universidad Politécnica de Cataluña. Unity es capaz de importar estos entornos en formato .fbx, propio de la familia Autodesk. Se adoptó este formato, debido a la facilidad de modelar un ambiente en esta plataforma.

En primer lugar, se realizó la toma de datos en campo, de las medidas de las áreas del laboratorio y sus elementos, mediante fotografías y videos se guardaron los detalles del entorno (ver Figura 24). Se dibujó un croquis en planta, para luego modelarlo en tres dimensiones en el programa Revit. Tomando en cuenta las características del laboratorio donde se realizó el ensayo, se obtuvo el modelo, generando un entorno lo más real posible, como se muestra en la Figura 25 y Figura 26.



Figura 24. *Fotografía del entorno real.*
Fuente: Elaboración propia

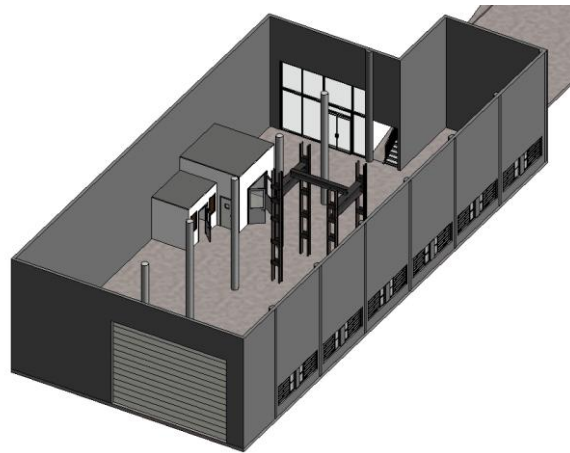


Figura 25. *Modelo completo laboratorio programa Revit*
Fuente: Elaboración propia



Figura 26. *Vista interior modelo laboratorio programa Revit*
Fuente: Elaboración propia

Se exportó el modelo en formato .fbx y se importó en el programa Unity (Figura 27), una vez que este fue terminado, de manera que el código que modela la viga o pilar ensayado, sitúa los objetos dentro del entorno en la posición real.

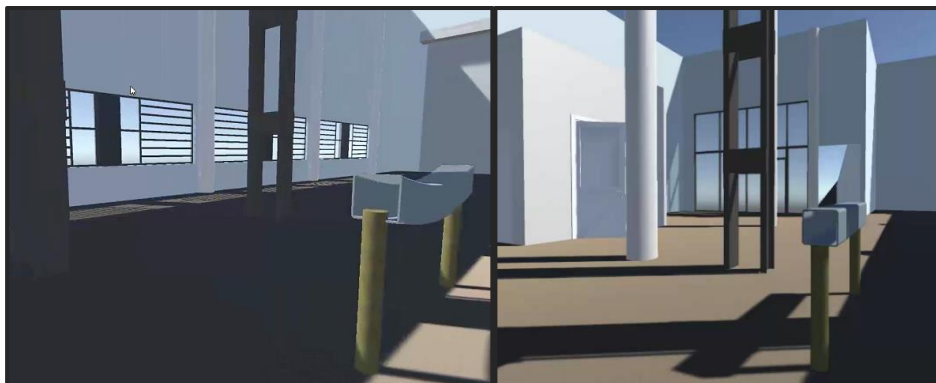


Figura 27. *Entorno virtual ensayo vigas programa Unity*
Fuente: Elaboración propia

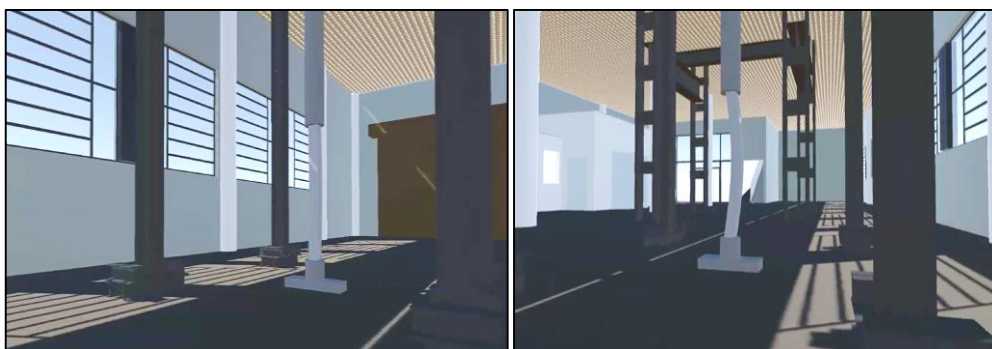


Figura 28. *Entorno virtual ensayo pilares programa Unity*
Fuente: Elaboración propia

Una vez introducido a Unity, es necesario la definición de los materiales de cada elemento, de forma que tengan una apariencia similar a la real. Un inconveniente en este proceso, es que cada vez que se carga el modelo .fbx en Unity, se deben definir nuevamente los materiales. Por esta razón, es importante completar el modelo en Revit para luego cargarlo a Unity y asignar los respectivos materiales.

De esta manera, se generó una aplicación que se convierte en una herramienta inmersiva, permitiendo una lectura de datos a tiempo real, un cálculo de la deformada de cada punto, y una muestra de resultados cercanos a la realidad. Con una actualización de datos rápida, y transportando al usuario a una ambiente virtual en el que es capaz de percibir la sensación de encontrarse en un ambiente real.

El siguiente paso, es generar el archivo ejecutable, que permita visualizar la aplicación tanto desde un ordenador, como desde cualquier tipo de gafas de Realidad Virtual. Dependiendo del caso, se debe considerar las herramientas a ser instaladas, y las opciones al momento de crear el ejecutable en Unity. En el caso de utilizar las gafas HTC

Vive, es necesaria la instalación del “Steam VR”, una librería vital para su funcionamiento.

Las herramientas descritas en todo el proceso de diseño y desarrollo de la aplicación, son explicadas en los siguientes apartados.

4.1.2. Sistema de Realidad aumentada

De acuerdo a los conceptos estructurales, del material y de la tecnología de realidad aumentada, se desarrolló la aplicación de acuerdo a la arquitectura presentada en la Figura 29, proceso que se describe a continuación.

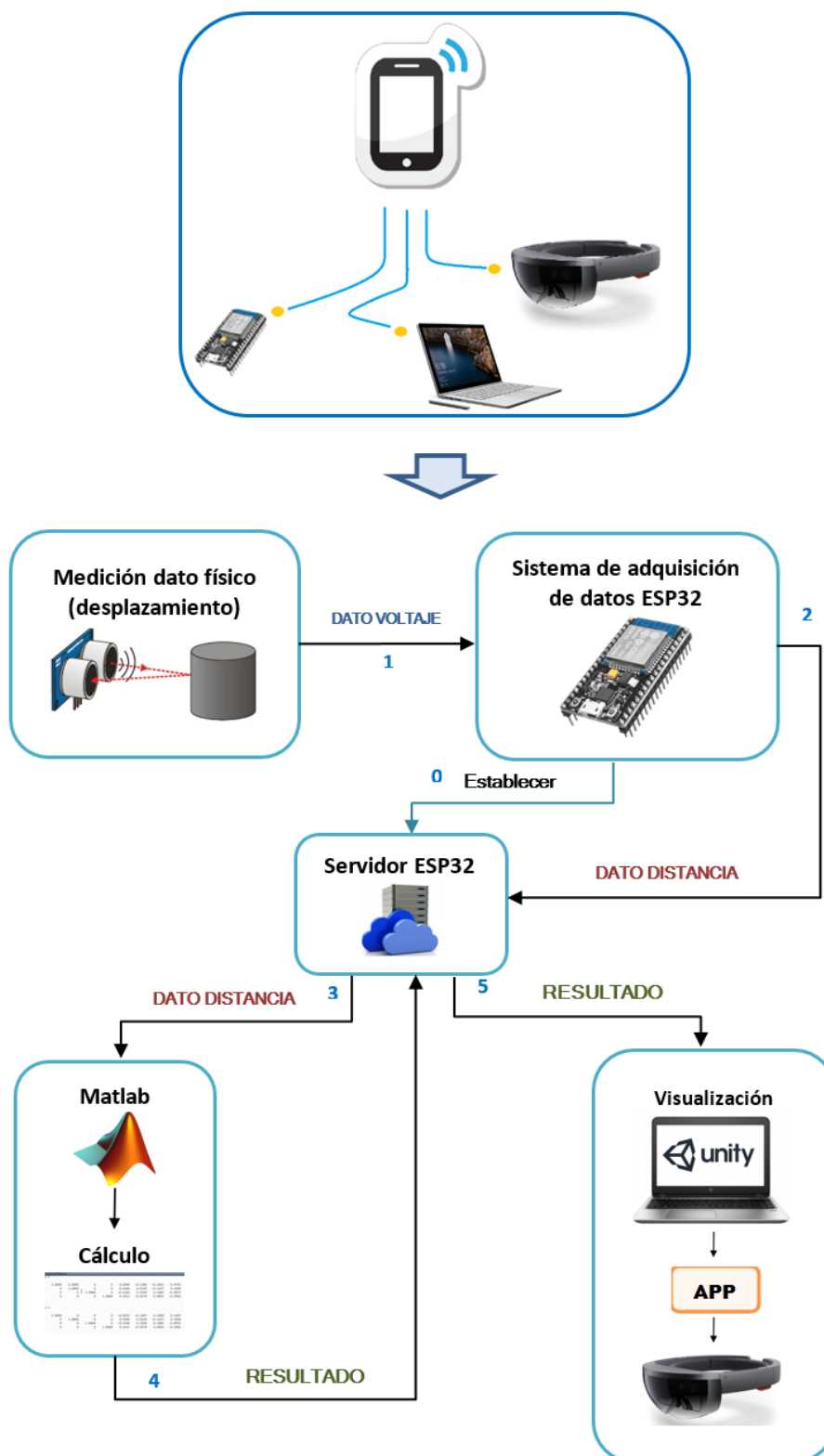


Figura 29. *Arquitectura sistema Realidad Aumentada*
Fuente: Elaboración propia

De acuerdo a la Figura 29, para asegurar el correcto funcionamiento de la aplicación, todos los equipos deberán estar conectados a una misma red. En este caso, se utilizó un teléfono móvil (iPhone 8), que actúa como router, al cual se conecta la placa ESP32, el ordenador y las gafas de realidad aumentada (HoloLens).

El primer paso del diseño del sistema fue la lectura del dato, tal como se realizó con la placa Arduino en el caso de realidad virtual, pero en este caso utilizando la placa ESP32, se extrae el dato del sensor, y la placa lo procesa para convertirlo en un dato físico, en este caso, la distancia o desplazamiento horizontal del pórtico.

Debido a que el proceso de este sistema es más largo que el de realidad virtual, el dato enviado por el sensor debe ser más estable. El sensor puede tener variaciones entre cada lectura, por lo tanto, adicionalmente a la calibración y verificación del dato proporcionado, se introdujo al código de Arduino, el cálculo del promedio de 20 lecturas. De esta manera, se elimina el ruido que se pueda presentar a causa de la superficie de rebote, o de alguna variación de voltaje o falla del sensor.

Para que la aplicación de realidad aumentada cumpla con el objetivo de ser visualizada con unas gafas potentes, como son las HoloLens, fue necesaria la transferencia de datos inalámbrica. Por este motivo, se opta por la conexión a una red y el envío de datos en formato JSON (JavaScript Object Notation), el cual es un formato de texto ligero, utilizado para el intercambio de datos, ya que es fácil de leer, escribir, dividir, generar, y es independiente del lenguaje de programación.

La placa ESP32, mediante un código de Arduino, es capaz de levantar su propio servidor, donde se cargarán y descargarán los datos necesarios a lo largo de la ejecución. Por lo tanto, lo primero que ocurre en el sistema es la creación del servidor, seguido de la lectura y procesamiento del dato. Éste dato es enviado al servidor, de manera que el programa Matlab, es capaz de leer este dato ingresando a la dirección URL creada.

En la Figura 30, se puede observar el recorrido del dato, y su formato, por los distintos elementos que conforman el sistema.

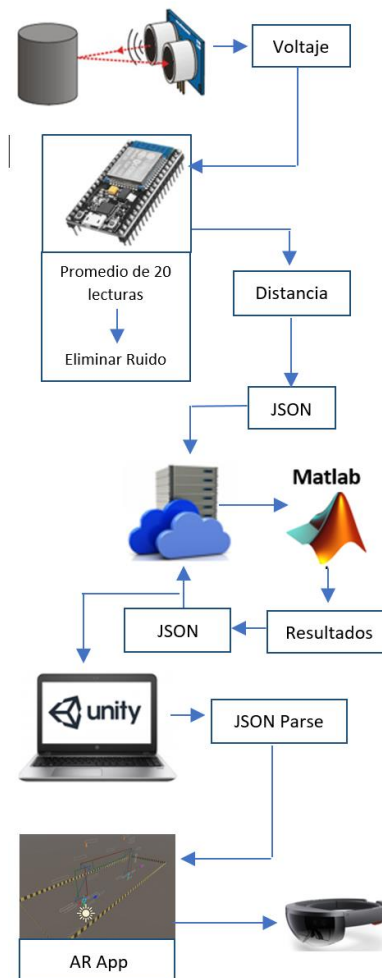


Figura 30. Flujo del dato en la aplicación AR
Fuente: Elaboración propia

Se desarrolló un código de análisis matricial, llamado “lineal10” (ver anexos), cuyo único dato de entrada es la distancia leída por el sensor y los datos de salida son los valores de las reacciones, la carga horizontal que está siendo aplicada, el desplazamiento de la estructura, los valores de los momentos en los otros nudos (para graficar el diagrama de momentos), la carga vertical aplicada y la escala a la cual se observarán los gráficos en Unity, la cual puede ser modificada para mejor visualización de los resultados. Los datos de salida, se envían como un vector cuyas posiciones corresponden a los valores mencionados anteriormente (ver Figura 31).

```
R =
-24.8200 → Rx1 [kN]
-0.7300 → Ry1 [kN]
33.2900 → M1 [kN*m]
-32.3900 → Rx2 [kN]
20.7300 → Ry2 [kN]
38.2400 → M2 [kN*m]
57.2200 → Ph [kN]
9.0000 → d [cm]
-16.3600 → M3 [kN*m]
-26.5400 → M4 [kN*m]
15.7800 → M5 [kN*m]
-9.9600 → M6 [kN*m]
10.0000 → Pv [kN]
0.0200 → Escala

http://172.20.10.9/save?reac=[-24.82,-0.73,33.29,-32.39,20.
```

JSON

Figura 31. Datos de salida código Matlab

Fuente: Elaboración propia

Los datos del programa, como la geometría, características de los materiales, número de nodos, valor de la carga vertical, entre otros, se declaran y definen dentro del código.

La numeración de los nodos, geometría y nombre de las variables se describen en la Figura 32, donde la numeración dentro de un círculo representa un nodo, y dentro de un rectángulo representa el número de elemento.

A_i , I_i , corresponden al área e inercia de cada elemento, respectivamente. P_h es la fuerza horizontal variable en el tiempo y P_v es la fuerza vertical aplicada antes del inicio de la aplicación virtual. Debido a que el material es el mismo para todo el pórtico, solo se utilizó la variable $E1$ para hacer referencia al módulo de elasticidad. El dato escala y distancia del sensor, como sus nombres indican, corresponden a la escala a la cual se visualizarán los gráficos en las gafas de realidad aumentada, y la distancia inicial del sensor, a la cual se resta la nueva distancia en el instante t , para obtener el desplazamiento en aquel instante.

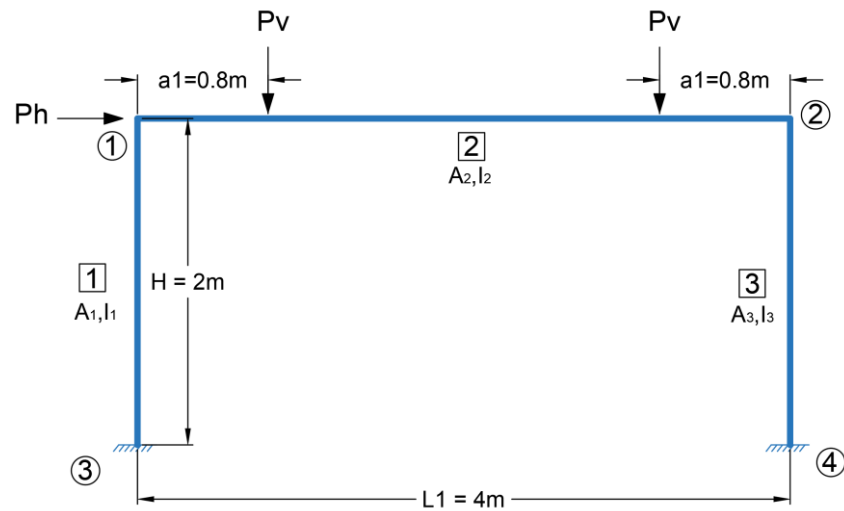


Figura 32. Numeración de nodos, barras, geometría y nombre variables pórtico
Fuente: Elaboración propia

El programa de Matlab, encargado de realizar el cálculo, toma en cuenta un rango lineal, y se aplica el método de rigidez. Debido a que en este caso, se conoce un desplazamiento, y la carga aplicada es desconocida, la única diferencia con un método tradicional es el procedimiento adicional que se explica a continuación.

Se adoptaron dos cargas horizontales, la primera $P_I = 0.5\text{kN}$, y la segunda $P_{II} = 0.6\text{kN}$, para las cuales se calculan sus respectivos desplazamientos, y al tratarse de un problema lineal, de acuerdo al principio de superposición, se puede determinar la carga real aplicada (P_{III}), a partir del desplazamiento registrado (δ_{III}), partiendo de los datos antes mencionados.

Vale decir:

$$\left. \begin{array}{l} \text{Para } P_I = 0.5[\text{kN}] \rightarrow \delta_I \\ \text{Para } P_{II} = 0.6[\text{kN}] \rightarrow \delta_{II} \end{array} \right\} \Delta\delta$$

Por lo tanto, al tratarse de un problema lineal:

$$\frac{P_I - P_{II}}{\delta_I - \delta_{II}} = \frac{P_I - P_{III}}{\delta_I - \delta_{III}}$$

$$P_{III} = P_I - (\delta_I - \delta_{III}) \frac{P_I - P_{II}}{\delta_I - \delta_{II}}$$

Siendo δ_{III} , el dato del desplazamiento de la estructura, proporcionado por el sensor de ultrasonido.

Con esta carga conocida, se calculan todos los desplazamientos, continuando según el método matricial, hasta obtener las reacciones en los apoyos y los esfuerzos en las barras.

El vector de salida, el cual incluye los resultados y datos antes mencionados, es enviado nuevamente al servidor mediante un código, al cual se lo llamó “leerdato3” (ver anexos), que se encarga de leer el dato de la distancia, realizar el análisis del problema llamando a la función del código descrito anteriormente, y enviar el vector de salida de esta función, nuevamente al servidor.

Para efectos de verificación del programa desarrollado en Matlab, se introdujeron los mismos datos en la aplicación de móvil “FrameDesign”, obteniendo los mismos resultados.

El siguiente paso es la visualización de los datos, del cual se encarga Unity. Se desarrolló un código en Visual Studio, el cual se explica a continuación.

En primer lugar, se declaran una serie de variables, que incluyen:

- Líneas tipo “Render”, las cuales sirven para graficar los diagramas de momentos, cortantes y axiles.
- Objetos con nombre “origen”, que se crearon para contar con una referencia en el espacio de las coordenadas de los nudos del pórtico, para poder situar las líneas de los gráficos con mayor facilidad y precisión.
- Variables booleanas llamadas “flag”, que se utilizaron para el uso de los botones, de manera que el usuario pueda ver y ocultar los elementos que desee.
- Variables tipo “point”, que corresponden a dos vectores donde se almacenan los datos extraídos del servidor, los cuales son separados posteriormente, ya que el dato leído es de tipo JSON, y tiene la estructura de un String.
- Variables públicas tipo “text”, que son las que nos permiten visualizar los valores numéricos dentro del entorno virtual, y van cambiando conforme se realiza una nueva lectura del dato del desplazamiento.
- Variables flotantes, son las correspondientes a los resultados numéricos necesarios para visualizar, o ejecutar cálculos.

El programa lee el dato del servidor, separa el “string” y almacena, en las posiciones de los vectores correspondientes, los datos que se encuentran separados por comas.

En cuanto al entorno de Unity, se crearon los objetos necesarios, como las flechas que indican cargas o reacciones, los textos y todo lo necesario para la creación de un buen entorno virtual, en el que no se requiere cargar un ambiente, ya que, en el caso de realidad aumentada, el ambiente es el real, que es observado por las gafas a través de una cámara, mostrando sobre este, los elementos virtuales creados

Para que el programa sitúe estos elementos dentro del entorno real, es necesario contar con un marcador (target), cuya posición se definió en la parte superior de la base del nodo 3.

Es importante desactivar el “Extended tracking”, de manera que una vez que las gafas encuentran el marcador (target), se conserva esa posición fija, aunque uno deje de ver el marcador, hasta que se reinicie la aplicación. Además, se debe activar la opción de “Spatial mapping” en el marcador, para que las coordenadas sean las correctas.

Para que el texto cambie en base a cada lectura, mostrando el valor actual de la variable, fue necesario definir cuadros de texto (*Canvas*) de manera individual para cada dato a mostrar. Las líneas de los gráficos se dibujaron mediante líneas “render”, de manera que sean notorias y se pueda modificar su posición final e inicial, en base al código de programación.

Además, se tuvieron que añadir objetos de escala muy reducida en los 4 nodos del pórtico, de manera que no sean visibles y sirvan de referencia para establecer correctamente las coordenadas utilizadas en la representación gráfica de los diagramas de esfuerzo en las barras. En el código desarrollado en Visual Studio, se guardaron las coordenadas de estos objetos de referencia en forma de vector, con la siguiente sintaxis: `Vector3 Coord_Origen1 = Origen1.transform.position`, donde Origen1 es uno de los objetos de referencia.

Como se mencionó anteriormente, estos diagramas se dibujaron mediante líneas tipo Render, en base a las coordenadas de los vectores creados, y asignando las coordenadas (x, y, z) de cada punto que conforma la poli-línea del diagrama de un elemento.

A continuación, se muestra un ejemplo mediante una sección del código, donde se dibuja el diagrama de momentos de un pilar (Figura 33).


```
Mlinea1.SetPosition(0, new Vector3(Coord_Origen1[0], Coord_Origen1[1],
Coord_Origen1[2]));
Mlinea1.SetPosition(1, new Vector3(Coord_Origen1[0] - M1v * Escala, Coord_Origen1[1],
Coord_Origen1[2]));
Mlinea1.SetPosition(2, new Vector3(Coord_Origen2[0] - M3v * Escala, Coord_Origen2[1],
Coord_Origen2[2]));
Mlinea1.SetPosition(3, new Vector3(Coord_Origen2[0], Coord_Origen2[1],
Coord_Origen2[2]));
```

Las cuatro líneas de código mostradas en el ejemplo, representan las coordenadas de cada punto de la poli-línea que forma el diagrama del elemento (Figura 33).

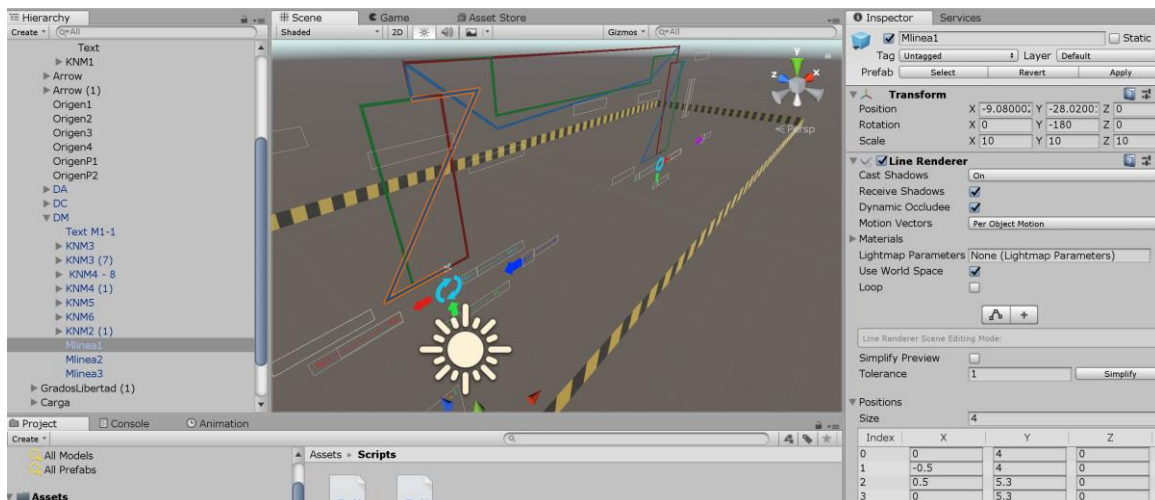


Figura 33. Elemento “LineRender” que representa el diagrama de momentos del pilar.
Fuente: (Unity, 2018) [Software]

Donde Mlinea1, es el objeto tipo “Line Render”, creado en la ventana “Hierarchy” a través de las componentes de Unity. Objetos que fueron generados uno por cada elemento, es decir, 3 líneas por pilar y 3 en la viga, para representar los diagramas de momentos, cortantes y axiles, respectivamente. Los valores M1v, M3v del ejemplo, son valores de los momentos enviados por el programa de cálculo, que se utilizaron para asignar las coordenadas iniciales y finales de cada línea. Estos valores fueron escalados para efectos de visualización, a través de un valor (Escala) que es introducido y puede ser modificado en el programa Matlab, debido a que los datos dentro de Unity se encuentran en metros.

En ciertas ocasiones, el programa puede confundir las coordenadas, generando los gráficos en el plano Y-Z, en el momento en el que la aplicación reconoce el marcador y lo fija como punto de referencia. Es probable que este error ocurra debido a una incompatibilidad del “Canvas” de Unity con las gafas HoloLens.

En la Figura 34, se muestra el resultado del desarrollo de la aplicación en el programa Unity, desde la ventana "Scene".

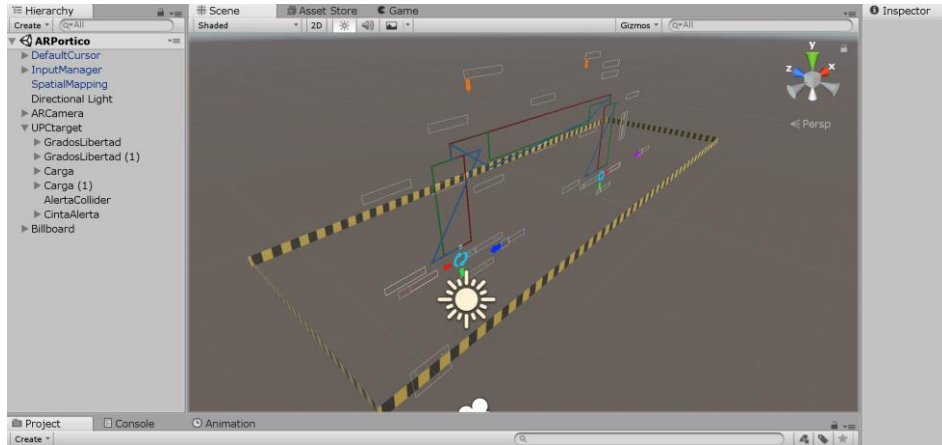


Figura 34. Entorno de desarrollo Unity.

Fuente: (Unity, 2018) [Software]

Conjuntamente, se añadieron botones que permiten activar o desactivar la visibilidad de acuerdo a requerimiento del usuario. El cual, puede ver todos los resultados a la vez, o individualmente. Se crearon dos grupos de botones, en el primero el usuario puede activar o desactivar las reacciones horizontales, verticales, momentos en las bases, desplazamiento y fuerza actuante, y en el segundo puede ver u ocultar los diagramas de momentos, cortantes y axiles (ver Figura 35).

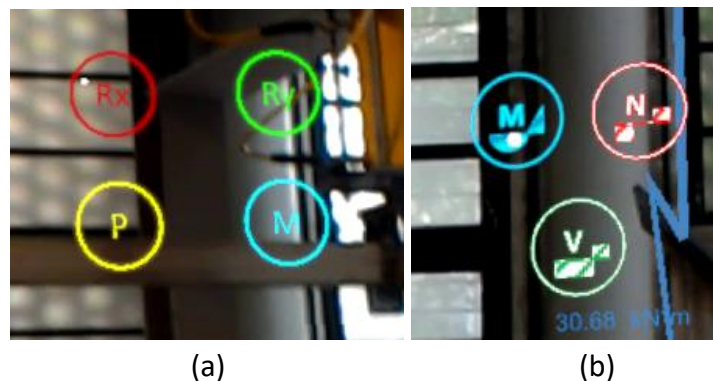


Figura 35. Botones para visualizar/ocultar (a) Reacciones y datos (b) Diagramas de esfuerzos

Fuente: Elaboración propia

Por otro lado, se añadió como función adicional, con la colaboración del departamento de CIMNE, y con respecto al tema de seguridad industrial, una banda de seguridad alrededor de todo el espacio del ensayo, la cual, si es sobrepasada, activa una alerta (ver Figura 36), de manera que el usuario debe respetar la distancia mínima de seguridad en este tipo de ensayos.



Figura 36. Alerta de seguridad al sobrepasar límites

Fuente: Elaboración propia

Una vez que la aplicación se encontraba lista para ser ejecutada, se realizó la carga del archivo ejecutable de la aplicación, a las gafas HoloLens, que permiten observar el ensayo cómo realmente se desea. Para esto, fue necesaria la instalación de los componentes que estas requieren (HoloToolkit), entre otras opciones a tomar en cuenta al momento de compilar.

La carga se realiza mediante Unity, construyendo el archivo ejecutable. Una vez que lo crea, se abre la aplicación en Visual Studio y se carga a las gafas, conectándolas a la misma red, e introduciendo el código IP que ésta nos brinda.

La aplicación compila y carga el programa, una vez que termina el proceso, ya no es necesario el uso de Unity ni de Visual Studio. Se puede correr la aplicación directamente desde las gafas, conectándolas a la red, como se explicó anteriormente. Por último, se realizaron las respectivas calibraciones y pruebas, de manera que los objetos digitales, se sitúen en la posición adecuada.

Por lo tanto, para ejecutar la aplicación, luego de posicionar el sensor e introducir los datos al código de Matlab, se debe conectar la placa ESP32 a una fuente de corriente, la cual automáticamente se conecta al teléfono móvil que funciona como router. El ordenador y las gafas también deben conectarse a la misma red. Se corre el programa de Matlab ("leerdato3"), de manera que, cada 5 segundos, o el tiempo que se defina, lee el dato, calcula y envía resultados a al servidor. Por otro lado, se corre la aplicación en las gafas y se visualizan gráficamente los resultados en un entorno y tiempo real.

Las herramientas mencionadas durante el proceso de diseño y desarrollo de la aplicación de Realidad Aumentada, son explicadas de manera específica en los siguientes apartados.

4.2. Herramientas de medición

4.2.1. Sensor de ultrasonido

Las aplicaciones desarrolladas, parten de la lectura de un dato físico, que para el caso de los ensayos de las estructuras de acero inoxidable, se presta especial interés al desplazamiento experimentado en un punto de la estructura en tiempo real.

Para poder adquirir este dato, se utilizó un sensor de ultrasonido HC-SR04 (Figura 37), que permite medir la distancia a la cual se encuentra un determinado objeto.



Figura 37. Sensor de ultrasonido HC-SR04

Fuente: Cythron Technologies, 2013

Este sensor tiene un precio muy bajo, (alrededor de 0.65€) y es de uso sencillo. Su rango de medición en términos prácticos, se encuentra entre 2 – 100 [cm], con una resolución en centímetros.

La baja precisión de este sensor es una limitante cuando los cambios de distancia no son notables, como se explicará posteriormente. Peses a esta desventaja, tienen una gran aplicación en el ámbito de la robótica, como detectores de obstáculos, posición, crear mapas de entorno, entre otros.

Se deben tomar en cuenta ciertas consideraciones al momento de utilizar este sensor, como es la superficie del objetivo, que debe ser de color claro, ya que una superficie oscura impide el rebote de las ondas, emitiendo medidas erróneas.

Funcionamiento:

El funcionamiento del sensor consiste en enviar un pulso de alta frecuencia, no perceptible por el oído humano, que rebota en el objeto y es reflejado hacia el sensor, que dispone de un micrófono adecuado para esta frecuencia. (Ver Figura 38)

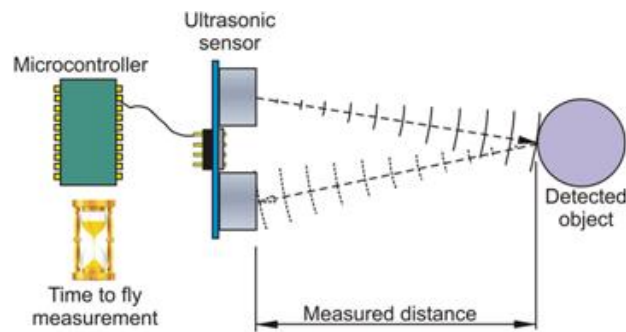
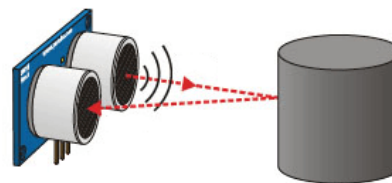


Figura 38. Funcionamiento sensor de ultrasonido HC-SR04

Fuente: www.techmake.com

Midiendo el tiempo que transcurre entre pulsos, y conociendo la velocidad del sonido (343 m/s), se puede estimar la distancia a la superficie de impacto del objeto, en condiciones de temperatura de 20°C, 50% de humedad, presión atmosférica a nivel del mar. Realizando la transformación de unidades y dividiendo entre dos, debido a que se consideró el tiempo de ida y vuelta del pulso (Figura 39), se tiene:

$$\text{Velocidad} = 343 \frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot 100 \frac{\text{cm}}{\text{m}} * \frac{1}{1000000} \frac{\text{s}}{\mu\text{s}} = \frac{1}{29.2} \frac{\text{cm}}{\mu\text{s}}$$



$$\begin{aligned} \text{Tiempo} &= 2 * (\text{Distancia} / \text{Velocidad}) \\ \text{Distancia} &= \text{Tiempo} \cdot \text{Velocidad} / 2 \end{aligned}$$

Figura 39. Cálculo de la distancia utilizando el sensor HC-SR04

Fuente: (Llamas, 2017)

Conectores del sensor:

El sensor contiene los siguientes conectores al momento de montarlo:

- ✓ VCC: Alimentación de 5V
- ✓ Trig: Emisor de la señal de ultrasonido
- ✓ Echo: Receptor de la señal de retorno de la onda
- ✓ GND: Ground o tierra (voltaje nulo);

Los cuales deben conectarse a un microcontrolador, en el caso de este trabajo, se utilizaron los microcontroladores Arduino y ESP32. El código que permite la lectura del dato se adjunta en la sección de Anexos, no requiere una librería extra y ambos microcontroladores funcionan con el mismo lenguaje de programación.

4.2.2. Sistema de adquisición de datos: Arduino Nano

Como se mencionó anteriormente, se utilizó la placa Arduino en el desarrollo de las aplicaciones VR, para la lectura, procesamiento y envío del dato físico (distancia).

Arduino es una plataforma de código abierto, para la creación de prototipos electrónicos, basado en hardware y software flexibles y fáciles de usar. El microcontrolador de la placa, se programa usando el “Arduino Programming Language”, mediante un software gratuito. [32]

Entre las ventajas de utilizar Arduino sobre otros sistemas podemos citar:

- Bajo costo: menor a 50€
- Multiplataforma: el software puede ser ejecutado en Windows, Macintosh y Linux.
- Entorno de programación simple y claro.
- Código abierto y software extensible: las herramientas del Arduino son de código abierto y el lenguaje puede ser extendido mediante librerías C++.
- Código abierto y hardware extensible: los diseñadores experimentados en circuitos, pueden mejorar el módulo o crear su propia versión del mismo.

Un microcontrolador es un circuito integrado que contiene en su interior, una unidad central de procesamiento (CPU), unidades de memoria RAM y puertos de entrada y salida. Se emplea para controlar las funciones de una o varias tareas determinadas.

Existen muchos modelos de placas Arduino, en el presente proyecto, se optó por utilizar la placa Arduino Nano, la cual se muestra en la Figura 40. La elección de esta placa se debe a su tamaño compacto, y debido a que el proyecto requiere la conexión de un solo sensor.



Figura 40. Placa Arduino Nano

Fuente: <https://store.arduino.cc/arduino-nano>

Las especificaciones técnicas de la placa, se adjuntan en la sección de anexos [33]. A continuación se nombran las más importantes.

- Microcontrolador: ATmega328 con 32 KB de memoria, donde se almacenará el código con las funciones a realizar.
- Alimentación por medio de cable Mini-B USB.
- 14 pines digitales de entrada o de salida, que operan mediante 5V.
- 8 pines analógicos de entrada, cada uno con 10 bits de resolución (1024 valores diferentes).

4.2.3. Sistema de adquisición de datos: ESP32

Como se mencionó anteriormente, para el desarrollo del sistema de Realidad Aumentada, se utilizó la placa ESP32, para la lectura, procesamiento y envío del dato físico (distancia).

La placa ESP32, es un sistema dual-core, es decir contiene dos procesadores que le permiten realizar múltiples tareas a la vez. Se puede observar un modelo de placa en la Figura 41.

Comparada con la placa Arduino Nano, la ventaja de la ESP32 es que contiene módulos de Wi-Fi y Bluetooth integrados, y su uso es sencillo. Además, el desarrollo de sus aplicaciones también se puede realizar utilizando el programa Arduino (en lenguaje C++). Estas ventajas permitieron realizar el envío y recepción de datos por medio de un servidor, de manera inalámbrica, rápida y automática.

La placa se alimenta por medio del puerto USB y contiene pines de entrada/salida que trabajan a 3.3V. [34]. En la sección de anexos, se pueden encontrar especificaciones técnicas más detalladas.



Figura 41. Placa ESP32

Fuente: <https://www.banggood.com/es/>

4.2.4. Anatomía de un código en Arduino

Como se mencionó anteriormente, tanto para la placa Arduino como para la placa ESP32, el código que es capaz de realizar las tareas deseadas, se programa en la plataforma Arduino y se compone básicamente, de las partes indicadas en el esquema de la Figura 42 que se muestra a continuación.

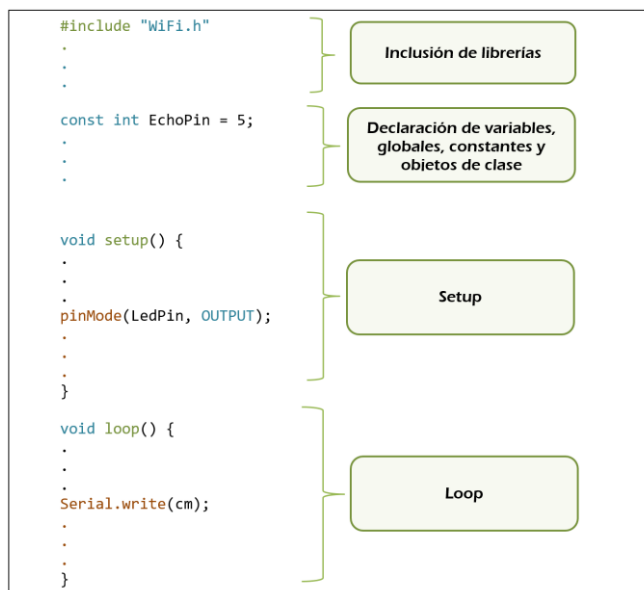


Figura 42. Anatomía de un código Arduino

Fuente: *Elaboración propia*

La inclusión de librerías es la primera parte que se debe definir en el código, comprende todos contenedores de funciones y utilidades que servirán para ejecutar las tareas deseadas.

En la declaración de variables se incluyen aquellas que serán utilizadas a lo largo del código, que pueden ser de distintos tipos, como enteras, flotantes, string, entre otros.

Posteriormente, se tiene la función “Setup”, la cual, se ejecuta una vez al iniciar Arduino y no vuelve a ejecutarse hasta que se reinicie la placa. Es la encargada de realizar la configuración previa al curso normal del programa, permite iniciar pines, o definir operaciones que consideremos oportunas.

Finalmente, se tiene la función “Loop”, en la cual se incluyen las operaciones que vayan a repetirse cíclicamente. Esta función se ejecuta después del setup y cuando termina, vuelve a ejecutarse infinitas veces hasta que el usuario finalice el programa.

4.3. Herramientas de cálculo

En la aplicación de Realidad Virtual, el código que permite obtener la simulación virtual de las estructuras, no requiere un cálculo complejo, debido a que la relación P- δ (fuerza-desplazamiento) es biunívoca, es decir, existe una relación directa entre ambas variables. Por lo tanto, no fue necesario el uso de un programa adicional que realice el cálculo. Es por eso, que el encargado del proceso matemático en las aplicaciones VR es Unity, a través de la plataforma de programación “Visual Studio” [35].

Sin embargo, en la aplicación de Realidad Aumenta, no se realiza una simulación, si no que se obtienen resultados de un análisis de una estructura más compleja. Por este motivo, se utilizó la herramienta de cálculo Matlab [2], la cual es un software de propiedad, que brinda licencias gratuitas para estudiantes.

Matlab es una herramienta de cálculo muy potente, un sistema algebraico computacional que ofrece un entorno de desarrollo integrado con su propio lenguaje de programación. Está disponible para sistemas operativos como Windows, Mac OS, Linux, entre otros.

Entre sus prestaciones se hallan el manejo del cálculo matricial, resolución de funciones, implementación de algoritmos, entre muchas otras. Matlab también es capaz de leer y enviar datos de un servidor, en formato JSON, función que fue utilizada en el proyecto.

Adicionalmente, para efectos de verificación, se utilizó la aplicación FrameDesign [6], diseñada para el sistema operativo de móviles Android, que realiza el análisis estructural de pórticos en 2D. Es un software gratuito, y bastante gráfico e intuitivo.

4.4. Herramientas de visualización

4.4.1. Entorno de realidad virtual

La realidad virtual es un entorno digital de apariencia real, representa escenas o imágenes de objetos producidos por un sistema informático, en el cual, el usuario tiene la sensación de estar inmerso.

Si bien no tiene ningún contacto con la realidad, es decir, todo lo que observa es totalmente digital, gracias al uso de unas gafas y accesorios como cascos, guantes, controles o audio, el usuario experimenta sensaciones que parecen ser reales e incluso, puede interactuar dentro de la aplicación.

Las herramientas utilizadas para este sistema de visualización se describen a continuación.

Gafas de Realidad Virtual HTC VIVE

Un casco o gafas de VR (Realidad Virtual) [36], es un dispositivo que permite reproducir imágenes creadas desde un ordenador. Debido a que la pantalla de estas gafas se sitúa a una distancia muy próxima a los ojos del usuario, estas crean un entorno con un campo de visión muy amplio, que permite la inmersión en este mundo digital, con una sensación de encontrarse en un mundo real.

Aunque cualquier proyecto creado, puede ser visualizado con distintos tipos de gafas, o desde el ordenador, se adoptaron como una buena herramienta de referencia las HTC Vive (Figura 43), debido a que son muy potentes y permiten que el entorno visualizado sea aún más real.

Para el uso de estas gafas, se deben instalar dos estaciones base, y requieren un espacio mínimo de 2x1.5m aproximadamente, y de 5m entre estaciones base. En la sección de anexos se describen las características, especificaciones técnicas y requerimientos de este tipo de gafas con mayor detalle.

En la Figura 44, se observa a un usuario durante la utilización de un sistema VR con gafas HTC Vive. Donde el usuario debe colocarse el casco y puede utilizar los controles para las funciones que lo requieran.



Figura 43. Gafas de VR HTC VIVE
Fuente: <https://www.vive.com/us/>

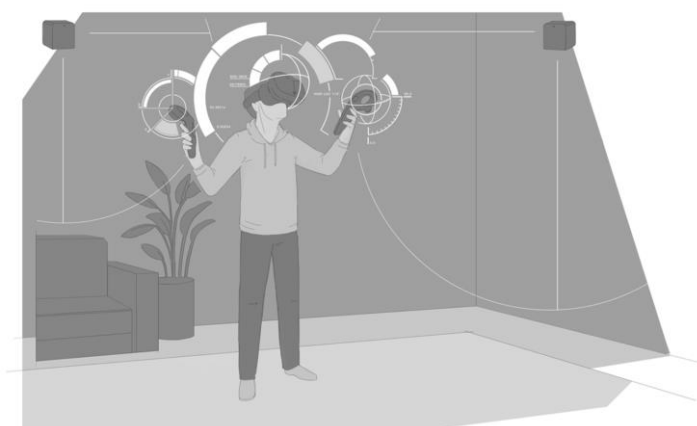


Figura 44. Usuario de sistema VR utilizando gafas HTC Vive
Fuente: <https://store.steampowered.com/>

El software utilizado para el desarrollo de las aplicaciones de realidad virtual es Unity[3], el cual se describe en el apartado 5.3.

Otras gafas de visualización VR

Los programas desarrollados en Unity, también pueden ser visualizados en otros tipos de gafas.

Existen las gafas Oculus Rift, Samsung Gear VR, Google Cardboard (Figura 45), que pueden variar desde 5 a 500€ de acuerdo a sus características, funcionalidad y dispositivo con el que vaya a ser utilizado.



Figura 45. Algunos tipos y marcas de gafas VR
Fuente: (Du et al., 2018)

4.4.2. Entorno de realidad aumentada

La realidad aumentada, a diferencia de la realidad virtual, permite que el usuario observe el entorno real pero con elementos virtuales superpuestos, mediante el uso de dispositivos como teléfonos móviles, tabletas, o dispositivos más potentes como las gafas.

La realidad aumentada está siendo muy utilizada en diferentes tipos de ámbitos, como ser, en la medicina, para visualizar los órganos antes o durante una cirugía, en ventas de coches o viviendas, de manera que el comprador visualice su compra antes de efectuarla, en educación, catálogos interactivos, arquitectura, decoración, publicidad, ingeniería y construcción, entre otros.

Esta tecnología pretende alcanzar niveles muy altos, mayores que el de la realidad virtual, ya que el uso que se le puede dar en distintas áreas es mayor, debido a que se experimenta un contacto más profundo con el mundo real, pudiendo interactuar con él desde otra perspectiva.

Gafas de Realidad Aumentada Microsoft HoloLens

Entre los dispositivos que nos permiten desarrollar e implementar esta tecnología, se encuentran las gafas Microsoft HoloLens (Figura 46). Estas gafas son muy utilizadas por desarrolladores, debido a su alto potencial. Su uso en el presente proyecto se debe a que, debido al manejo de una serie de datos, nos permiten desarrollar aplicaciones más precisas, nítidas y rápidas. Las especificaciones de estas gafas se adjuntan en la sección de anexos [37]



Figura 46. Microsoft HoloLens

Fuente: <https://www.microsoft.com/es-es/hololens>

Para su aplicación, solo es necesario que las gafas estén cargadas y que la aplicación a utilizar se encuentre en la memoria de las mismas. El usuario interactúa con ellas de manera similar a un ordenador, pero la manera de seleccionar las funciones se realiza con el dedo y en el aire. En la Figura 47, se observan a dos usuarios interactuando con estas gafas y esta tecnología.

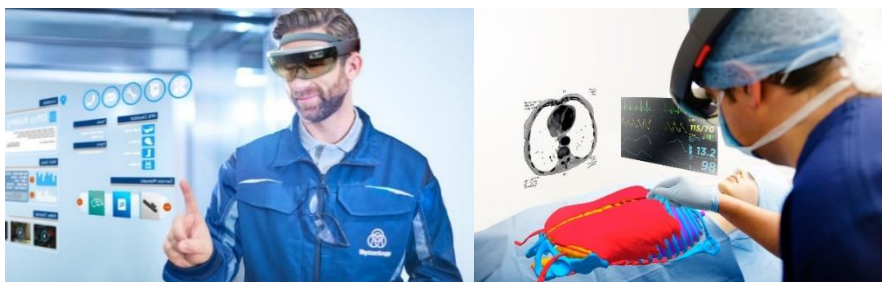


Figura 47. Usuarios interactuando con AR mediante HoloLens

Fuente: <https://www.technologyreview.es/>

Al igual que en el caso de realidad virtual, se utilizó el programa Unity para el desarrollo de la aplicación de realidad aumentada, el cual se describe en el siguiente apartado.

4.4.3. Software Unity

El software más utilizado y completo para el desarrollo de aplicaciones de Realidad Virtual y Aumentada es Unity [3]. Una herramienta que permite desarrollar videojuegos de alta definición y en tres dimensiones, para diversas plataformas, como por ejemplo, iOS, Android, Vuforia, entre otras. La plataforma utilizada en el proyecto es Vuforia [4], debido a que se ejecutó la aplicación AR en las gafas HoloLens.

Unity es un software gratuito si se usa de forma personal o educativa, y no profesional. Permite programar en el lenguaje C# o JavaScript, a través de la herramienta de Microsoft Visual Studio.

Actualmente, está siendo utilizado en la industria automotriz, de transporte, con archivos CAD, en películas, arquitectura, ingeniería y construcción, ya que permite desarrollar aplicaciones en tiempo real, actualizadas, agilizando el flujo de trabajo, en ciclos de diseño, construcción y funcionamiento, como se mencionó anteriormente.

Unity es un motor de desarrollo en 3D, y como tal, se deben conocer los siguientes conceptos:

- Las coordenadas (x, y, z) traen información de la posición, rotación y dimensión en un mundo 3D, se conocen como coordenadas cartesianas, donde el eje z representa la altura, y la profundidad, y x la posición horizontal.
- Para simplificar, se usan coordenadas locales (o relaciones padre-hijo), para definir la posición con respecto a otro objeto. Esto se establece arrastrando un objeto dentro de otro, el objeto arrastrado será el hijo del primero, y las coordenadas se leerán en términos relativos a la posición del padre.
- Los vectores 3D son líneas en el espacio tridimensional con dirección y longitud.
- Las cámaras son esenciales en el mundo 3D y actúan como una ventana, se pueden colocar en cualquier punto del mundo, animarse o adjuntarse a objetos como parte del escenario. En el caso de la aplicación AR, se creó una cámara AR para este tipo de aplicación.
- El *Canvas* se utiliza para contener todos los elementos de la interfaz de usuario y para darles propiedades específicas. En el espacio de la pantalla, los objetos se colocan encima de la vista de la cámara, mientras que en el espacio mundial, los objetos se posicionan en el mundo 3D.
- Un *GameObject*, es un objeto fácilmente manejable, a los que se pueden añadir *componentes*, las cuales a su vez tienen propiedades esenciales o configuraciones para controlarlas. La componente *Transform*, permite modificar su posición, rotación y escala. Estos objetos pueden ser anidados en la ventana *Hierarchy* (jerarquía).
- Los *Assets*, son construcciones de bloques del proyecto. Desde texturas de imágenes, hasta sonidos, por eso se crea una carpeta "Assets" en todo proyecto.

- La escena es el entorno donde se trabaja, se pueden tener varias de ellas, en el caso del proyecto solo se creó una. Pueden ser manipuladas y construidas en la ventana “Hierarchy” y “Scene”.
- En la ventana “Inspector”, uno puede encontrar las propiedades de un objeto o componente, para poder editarlas.

En la Figura 48, se puede observar la interfaz de Unity, con los elementos mencionados anteriormente.

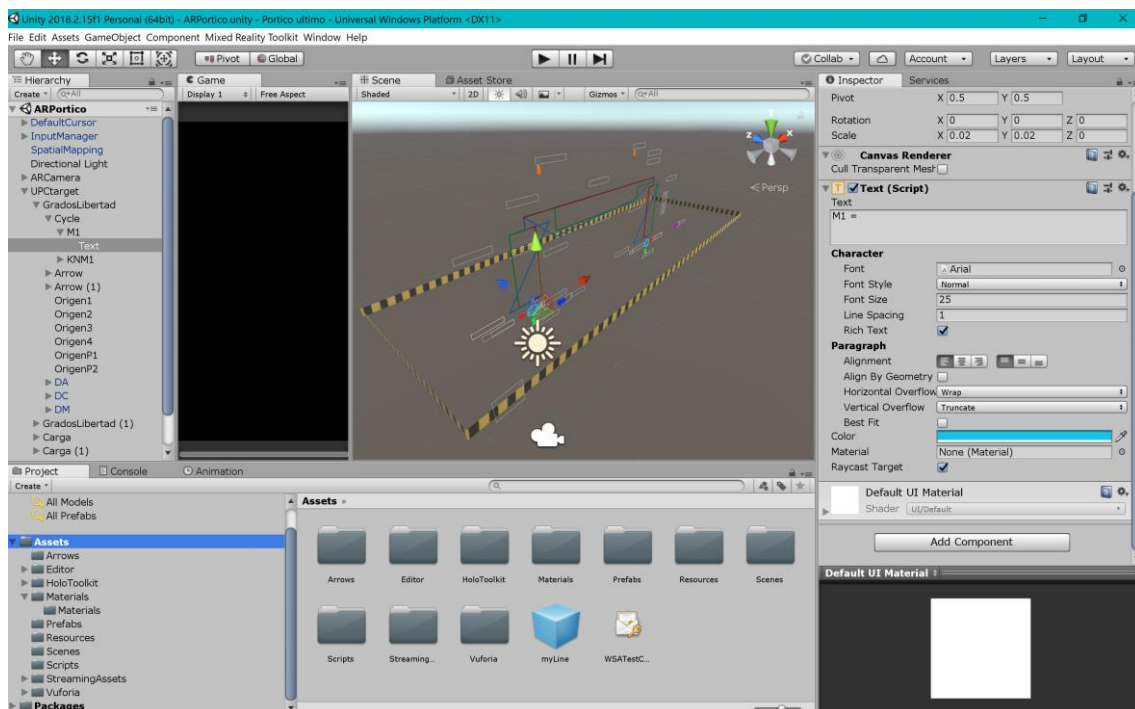


Figura 48. Interfaz de Unity.
Fuente: (Unity, 2018)

4.4.4. Anatomía de un Script en Visual Studio

Un Script, es el código escrito en Visual Studio [35], el cual se carga a un objeto en Unity y permite la creación de un programa. Contiene las partes similares a un código Arduino, y son las que se indican en la Figura 49.

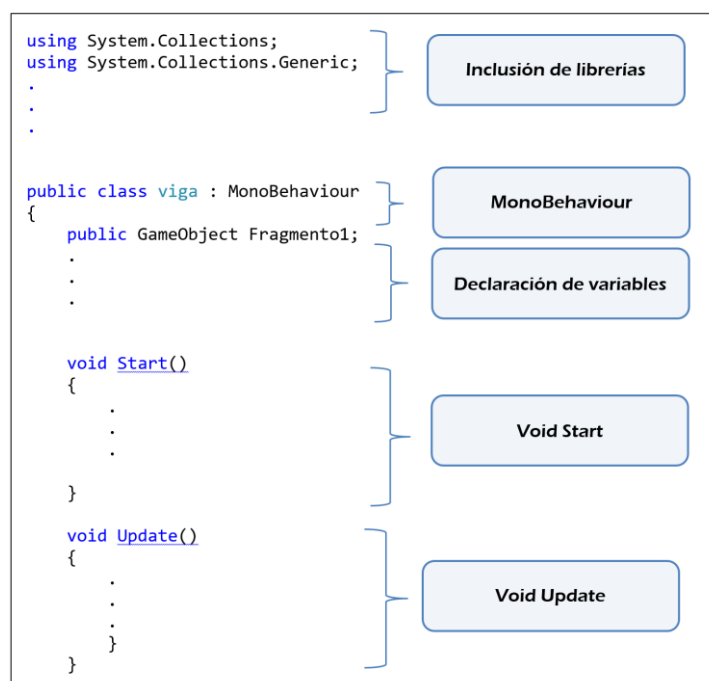


Figura 49. Anatomía Script en Unity

Fuente: Elaboración propia

En primer lugar, se incluyen las librerías a utilizarse, que son el grupo de funciones y utilidades que simplifican el código.

Posteriormente, se crea una clase, que tiene que ver con el funcionamiento interno de Unity, al implementar una clase que deriva de una integrada llamada *MonoBehaviour*. Luego, se definen las variables, que pueden ser de distintos tipos, desde números enteros hasta objetos, públicas o privadas, y que serán utilizadas a lo largo del código.

La función *Start*, al igual que la función *Setup* en Arduino, se ejecuta una sola vez, y sirve para la inicialización del programa. Mientras que dentro de la función *Update*, se debe escribir el código que se encargará de la actualización por *frame* para el *GameObject*. Es decir, se incluye básicamente, lo que debe ser manejado en el tiempo durante la ejecución del programa ya que se repetirá cíclicamente, hasta que el usuario de fin a la aplicación.

CAPÍTULO V: APLICACIÓN EN ENSAYOS DE LABORATORIO

5.1. Ensayos de vigas

La aplicación de realidad virtual explicada anteriormente, se implementó de manera práctica, en ensayos de laboratorio de vigas y pilares de acero inoxidable, diferenciándose en las ecuaciones de la elástica, y la posición del elemento. A continuación se explica su aplicación práctica en vigas.

Se realizaron cuatro ensayos en vigas de sección rectangular hueca (RHS) de acero inoxidable de tipo austenítico EN. 1.4301. Cada viga se apoya en dos puntos y se le aplican dos cargas puntuales de acuerdo a las posiciones y dimensiones indicadas en el esquema de la Figura 50. Se utilizaron bloques de madera en los apoyos, para asegurar la rigidez y evitar una falla por abolladura en el alma.

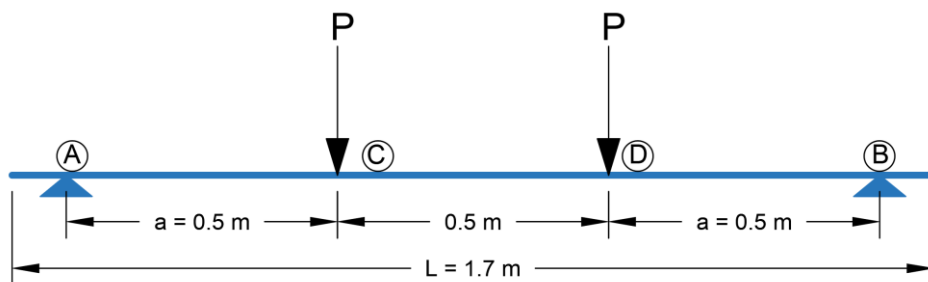


Figura 50. Esquema ensayo vigas
Fuente: Elaboración propia

Los perfiles de los cuatro ensayos son de sección rectangular hueca de las dimensiones que se indican en la Tabla 1.

Tabla 1. Secciones de vigas ensayadas en laboratorio

No. Ensayo	Sección
1	120x80x6
2	100x80x4
3	120x40x4
4	200x100x3

Fuente: Elaboración propia

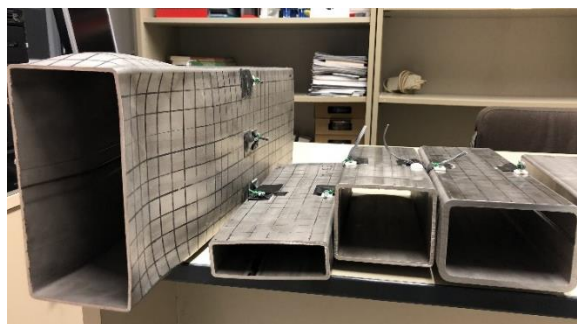


Figura 51. Secciones de vigas ensayadas en laboratorio
Fuente: Elaboración propia

Para estos ensayos, el sensor fue colocado debajo del punto central de la viga, como se muestra en la Figura 52, de manera que la lectura corresponda a la flecha máxima experimentada por el elemento, y a partir de este dato, se calculan las coordenadas de los otros puntos de la barra.

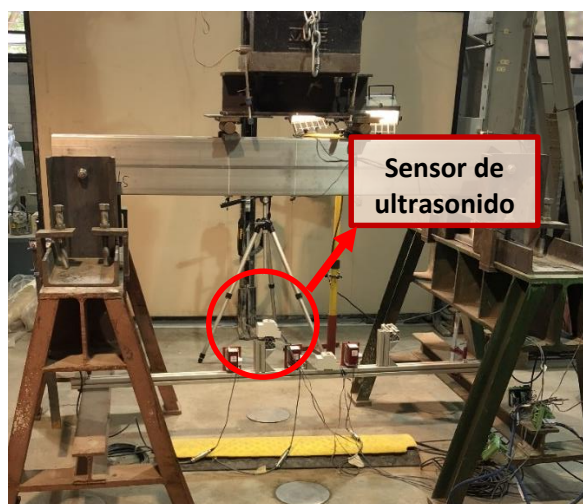


Figura 52. Ubicación sensor de ultrasonido en ensayo de vigas
Fuente: Elaboración propia

Antes de ejecutar la aplicación desarrollada, se deben definir las variables mostradas en la Figura 53. Las cuales indican la distancia inicial del sensor a la cara de la viga, y la escala, la cual, si difiere de 1, aleja el entorno de la realidad. Sin embargo, se puede modificar este dato en caso de que se quiera observar el ensayo a mayor o menor escala, de acuerdo a los desplazamientos que se prevean.

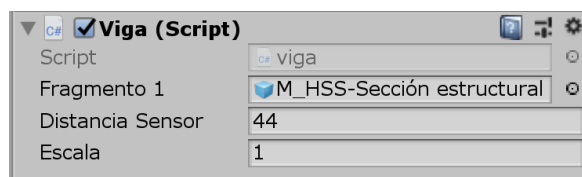


Figura 53. Datos de entrada aplicación realidad virtual vigas
Fuente: Elaboración propia

Los resultados del desarrollo de la aplicación para ensayos de laboratorio de vigas de acero inoxidable, se presentan a continuación.

Se obtuvo una aplicación con la cual el usuario es capaz de transportarse, mediante un entorno virtual, a un escenario cercano a la realidad. En este caso, el usuario puede observar lo que sucede en un ensayo de una viga, sin necesidad de estar presente. A tiempo real y con datos reales, mediante el uso de un sensor.

El resultado que se observa en el ordenador, es similar con el uso de cualquier dispositivo de visualización de Realidad Virtual, los cuales permiten que la visión del usuario sea completa, brindando una sensación real.

Los resultados se presentan en formato de imágenes, partiendo de la Figura 54 a la Figura 59, tanto del ensayo real (en laboratorio), como el de la visualización virtual, además de la comparación de ambos, ejecutando la aplicación desde un ordenador.



Figura 54. Ensayo viga en estado inicial (entorno real)
Fuente: Elaboración propia

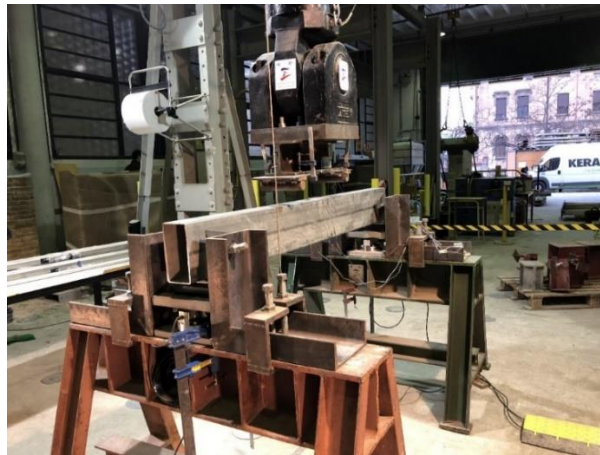


Figura 55. *Vista lateral ensayo viga en estado inicial (entorno real)*
Fuente: Elaboración propia



Figura 56. *Ensayo viga en estado deformado (entorno real)*
Fuente: Elaboración propia

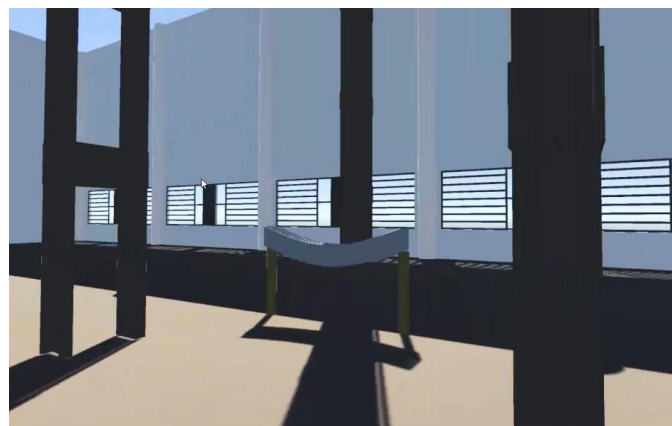


Figura 57. *Ensayo viga en estado deformado (Entorno virtual)*
Fuente: Elaboración propia



Figura 58. Entorno real vs. entorno virtual
Fuente: Elaboración propia

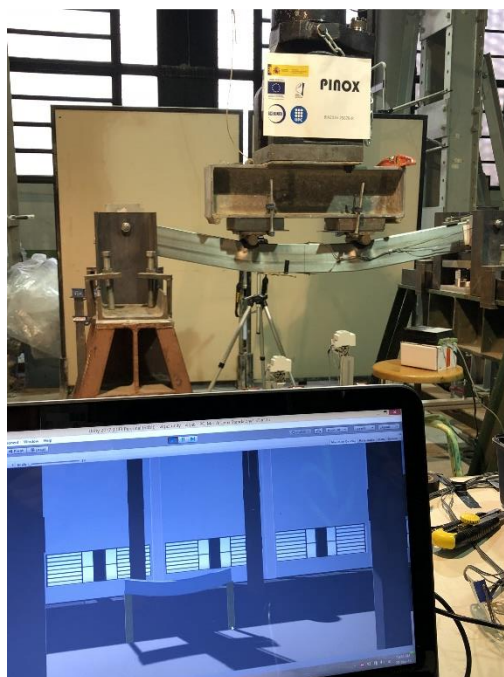


Figura 59. Entorno real y virtual durante el ensayo
Fuente: Elaboración propia

Progreso de los resultados.

A continuación se muestra el progreso de la aplicación de realidad virtual aplicada en ensayos de vigas, conforme iban ejecutándose y probándose en cada ensayo de laboratorio.





	<p><u>Ensayo 1</u></p> <p>Viga Clase 4 120 x 80 x 6</p> <p>Desplazamiento máximo: 45 [mm]</p>
	<p><u>Ensayo 2</u></p> <p>Viga Clase 3 100 x 80 x 4</p> <p>Desplazamiento máximo: 56 [mm]</p> <p>Mejoras: Entorno más completo, mejor desplazamiento y rotación del usuario o la cámara.</p>
	<p><u>Ensayo 3</u></p> <p>Viga Clase 2 120 x 40 x 4</p> <p>Desplazamiento máxima: 546 [mm]</p> <p>Mejoras: Adición de elementos al entorno (apoyos viga), generación de sección hueca en vez de maciza (importación elemento Revit)</p>
	<p><u>Ensayo 4</u></p> <p>Viga Clase 1 200 x 100 x 3</p> <p>Desplazamiento máxima: 14 [mm]</p> <p>Mejoras: Mayor discretización, ajustes en tiempo de envío y recepción de datos, mejoras en la velocidad y procesamiento de datos.</p>

Figura 60. Progreso del desarrollo de la aplicación VR en cada ensayo de vigas

Fuente: Elaboración propia

Adicionalmente, en la Tabla 2 se presentan los resultados a efectos estructurales, donde F_u y M_u corresponden a la carga y momento último respectivamente, y du es el desplazamiento máximo para dicha carga.

Tabla 2. Resultados experimentales en ensayos de vigas

No. Ensayo	Sección	F_u [kN]	du [mm]	M_u [kNm]
1	120x80x6	232.6	44.8	57.6
2	100x80x4	92.4	56.4	22.9
3	120x40x4	105.6	546.2	26.1
4	200x100x3	114.3	14.1	28.3

Fuente: (Arrayago, 2019)

5.2. Ensayos de pilares

Se realizaron ocho ensayos en pilares de acero inoxidable, de las mismas secciones que las vigas, dos por cada tipo de sección, uno alrededor de su eje fuerte y otro en base a su eje débil.

El ensayo consiste en aplicar una carga puntual en la parte superior de un pilar cuyas condiciones de apoyo permiten una rotación. Estos apoyos consisten en dos placas soldadas a los extremos y unidas mediante pernos, liberando la rotación alrededor del eje estudiado.

Los pilares son de 1.50 metros de longitud. La carga es aplicada lentamente, controlando el desplazamiento, a una razón de 0.2mm/min. En la Figura 61 se presenta un esquema y el pilar a ser ensayado.

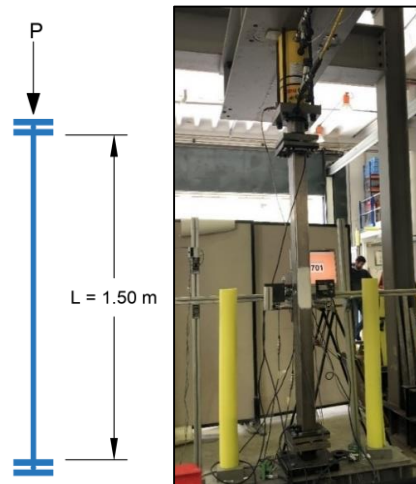


Figura 61. Ensayo pilares

Fuente: Elaboración propia



Figura 62. Montaje ensayo pilares

Fuente: (I Arrayago & Real, 2019)

Los ensayos ejecutados, son parte del proyecto de investigación de la Universidad Politécnica de Cataluña, acerca del acero inoxidable. Es por eso, que se observan galgas extensiométricas, sensores infrarrojos, y equipo especializado para la obtención de resultados precisos en el estudio del material y la estructura. Sin embargo, ninguno de los equipos instalados, tanto para el presente proyecto como para el de investigación del material, resulta ser perjudicial para el otro.

Se instaló el sensor en una posición lo más cercana posible al centro del pilar, para poder leer el desplazamiento máximo experimentado y a partir de este dato, asignar las coordenadas de los elementos del pilar discretizado. En la Figura 63, se observa la ubicación del sensor de ultrasonido en el ensayo de laboratorio de los pilares.

Es importante mencionar, que el entorno fue mejorado a medida que avanzaban los ensayos. Es por eso que se podrán notar diferencias entre los ensayos de vigas y pilares, ya que se inició con las vigas. El entorno de pilares difiere en la posición y en la presencia de algunos elementos, como se muestra en el apartado 6.1.1., debido a que se trata de otro tipo de ensayo.



Figura 63. Ubicación sensor de ultrasonido en ensayo de pilares
Fuente: Elaboración propia

Antes de ejecutar la aplicación desarrollada, se deben definir las variables mostradas en la Figura 64. Las cuales indican la distancia inicial del sensor a la cara del pilar, y la escala, la cual, si es diferente a 1, aleja el entorno visual de la realidad. Sin embargo, se puede modificar este dato en caso de que se quiera observar el ensayo a mayor o menor escala, de acuerdo a los desplazamientos que se prevean.

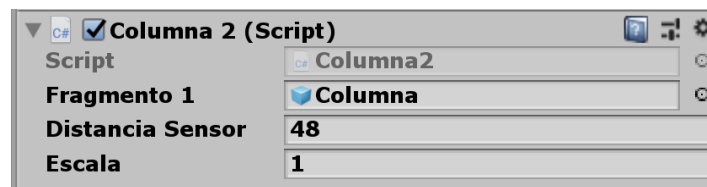


Figura 64. Datos a definir antes de iniciar a ejecutar la aplicación de Realidad Virtual
Fuente: Elaboración propia

Se obtuvo una aplicación con la cual el usuario es capaz de observar lo que ocurre en un ensayo de laboratorio de pilares de acero inoxidable. Sin necesidad de estar presente, mediante gafas de Realidad Virtual, o mediante un ordenador, puede ver el desarrollo del ensayo, en tiempo real y con datos reales, medidos a través de un sensor.

En este caso, a diferencia del caso de las vigas, se obtienen desplazamientos muy pequeños, que en el momento de visualizar, son imperceptibles para el usuario. Aunque estos desplazamientos pueden ser escalados, la visualización con una escala diferente de 1, se alejaría de la realidad que la aplicación pretende mostrar en un mundo virtual.

A continuació se presenten els resultats del desenvolupament de l'aplicació en format de imatges, a partir de la Figura 65 a la Figura 70, tant del ensayo real (en laboratori), com el de visualització virtual.

Se presenten els resultats amb deformacions reals, és a dir, una escala igual a la unitat, i també resultats amb una ampliació del desplaçament.



Figura 65. *Ensayo pilar en estado inicial*
Fuente: Elaboración propia

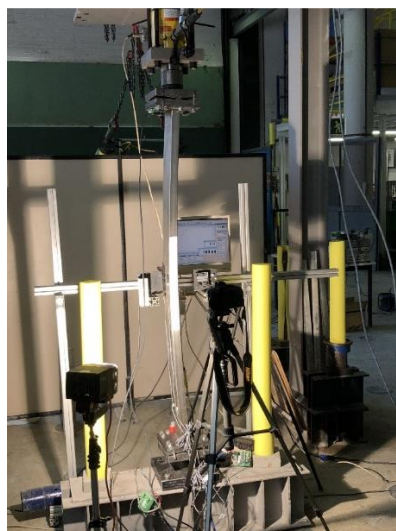


Figura 66. *Ensayo pilar en estado deformado.*
Fuente: Elaboración propia

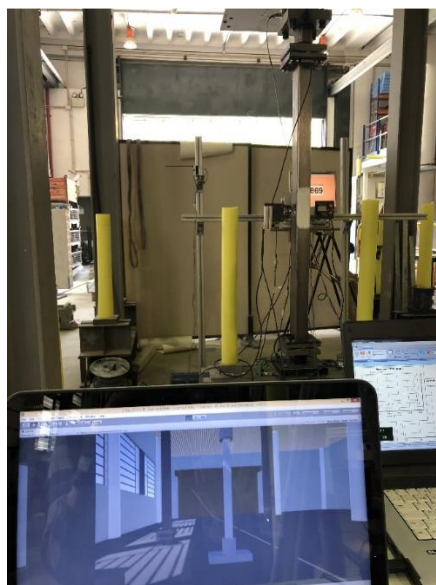


Figura 67. *Ensayo pilar visto en entorno real y virtual*
Fuente: Elaboración propia

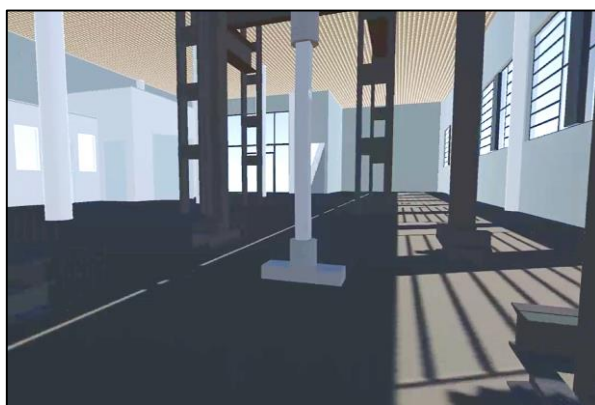


Figura 68. *Vista amplia en aplicación de Realidad Virtual en ensayo de pilares*
Fuente: Elaboración propia



Figura 69. *Ensayo pilar deformado visto desde aplicación VR (escala=1)*
Fuente: Elaboración propia



Figura 70. Pilares deformados vistos en aplicació VR a mayores escalas
Fuente: Elaboración propia

En la Tabla 3, se presentan los resultados de los ensayos en términos estructurales, donde N_u es la carga axial última de compresión y d_u es la deflexión lateral correspondiente a N_u . Se observa que los desplazamientos son mucho menores que en las vigas, y por lo tanto, poco perceptibles por el ojo humano.

Tabla 3. Resultados experimentales en ensayos de pilares

Ensayo	Eje pandeo	N_u [kN]	d_u [mm]
S1-C1	Mayor	---	---
S1-C2	Menor	---	---
S2-C1	Mayor	491.9	14.4
S2-C2	Menor	454.4	11.2
S3-C1	Menor	194.8	13.5
S3-C2	Menor	202.5	12.5
S4-C1	Mayor	407.6	0.9
S4-C2	Menor	440.1	6.4

Fuente: (I Arrayago & Real, 2019)

5.3. Ensayos de pórticos

La aplicación de Realidad Aumentada ha sido desarrollada para su implementación en un ensayo de laboratorio real de un pórtico de acero inoxidable.

El ensayo consiste en aplicar una carga vertical (P_v), en dos puntos (ver Figura 71), hasta alcanzar un valor máximo a definirse previamente al ensayo. Una vez que se termina de aplicar esta carga, se procede a cargar el pórtico horizontalmente. La aplicación AR desarrollada en el proyecto se implementa a partir de este momento, y para la variación de esta carga horizontal.

El montaje del ensayo se realiza de distinta forma al planteado en el estudio, debido a que al aplicar la carga horizontal en los nodos superiores, las cargas verticales no actuarían en un mismo punto durante todo el ensayo. Por este motivo, la tipología del ensayo consiste en un pórtico invertido, es decir, se aplica la carga horizontal en los nodos inferiores, y se asegura el empotramiento en los nodos superiores. En la Figura 71, se puede observar el montaje de manera esquemática, y en la Figura 72, mediante una fotografía.

A pesar de que el montaje es diferente, el sistema es equivalente, por lo tanto, los resultados de la aplicación AR, se muestran de acuerdo al pórtico definido en las bases teóricas.

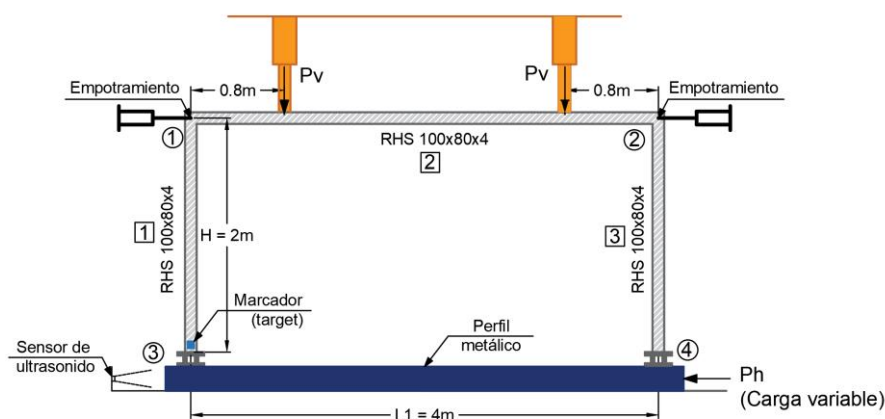


Figura 71. Esquema montaje ensayo
Fuente: Elaboración propia

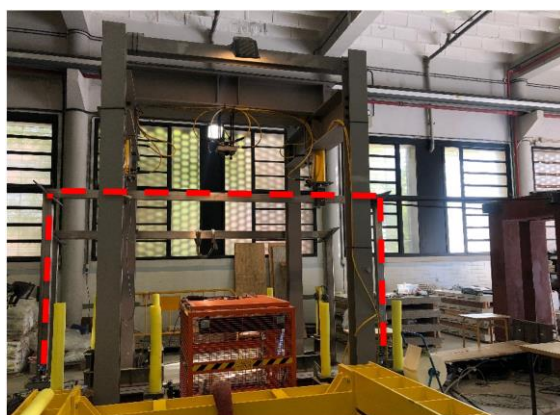


Figura 72. Fotografía montaje ensayo pórtico
Fuente: Elaboración propia

La posición del sensor, del marcador y la geometría del ensayo, se muestran esquemáticamente en la Figura 71. Además, se puede observar mediante fotografías del

montaje del ensayo, las posiciones del marcador (Figura 73), del sensor (Figura 74) y de ambos en una misma fotografía del nodo 3 (Figura 75).

Adicionalmente, se debe contar con la presencia del ordenador, que contiene el programa de Matlab encargado del cálculo, un teléfono móvil, como router para que los tres dispositivos se conecten un la misma red (placa ESP32, ordenador y gafas HoloLens) y las gafas AR HoloLens (Figura 76).



Figura 73. Posición marcador (target)
Fuente: Elaboración propia



Figura 74. Posición del sensor de ultrasonido en el ensayo del pórtico
Fuente: Elaboración propia



Figura 75. Posición del sensor y marcador en montaje del ensayo del pórtico (nodo 3)
Fuente: Elaboración propia.

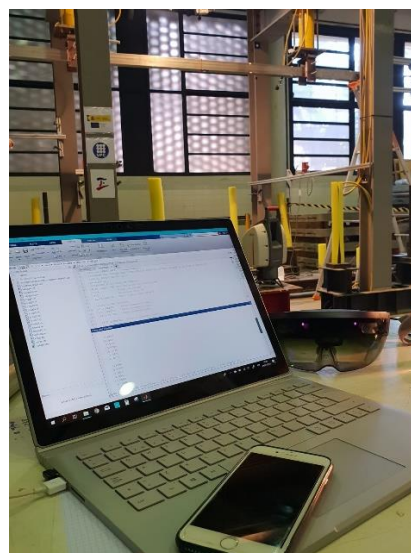


Figura 76. Herramientas adicionales necesarias en el ensayo (ordenador, teléfono móvil y gafas HoloLens)
Fuente: Elaboración propia

Como se puede ver en las fotografías anteriores, además del equipo mencionado para la aplicación de este trabajo, se instalaron sensores de mayor precisión en las bases, galgas extensiométricas, y equipo especializado, que proporcionan resultados precisos para el estudio del material y la estructura. Esto se debe a que el ensayo se realiza principalmente, como parte de los estudios que están siendo ejecutados por la Universidad Politécnica de Cataluña acerca del acero inoxidable. Sin embargo, las herramientas instaladas para ambos proyectos no interfieren en entre ellas.

El material es el mismo que se utilizó en los ensayos de vigas y pilares, acero inoxidable austenítico, para el cual se adoptó un valor del módulo de elasticidad de $E = 200 \times 10^3 [\text{MPa}]$ [7].

Todos los perfiles tienen una sección RHS 100x80x4, es decir, un área de $13.2 \times 10^2 [\text{mm}^2]$, y un momento de inercia de $186 \times 10^4 [\text{mm}^4]$ en su eje fuerte, alrededor del cual están orientados los perfiles, para recibir los esfuerzos solicitantes.

Se obtuvo una aplicación de realidad aumentada, que es ejecutada a través de unas gafas HoloLens, con las cuales el usuario puede observar, virtualmente y sobre el entorno real, los resultados de un ensayo de laboratorio de un pórtico con la geometría indicada en los apartados anteriores, de manera inmediata y a tiempo real a medida que transcurre el ensayo.

Entre estos resultados se encuentran las reacciones en los apoyos, los diagramas de momentos, cortantes y axiles. El programa también muestra la fuerza que está siendo aplicada, el desplazamiento a causa de esta fuerza, que es leído por el sensor, y las cargas verticales previamente aplicadas.

Prueba preliminar

Se realizó una primera prueba como simulación del ensayo, alterando gradualmente el desplazamiento registrado y adoptando una carga vertical máxima de $10 [\text{kN}]$, a partir de la cual, se inicia la aplicación de la carga horizontal, junto con la ejecución del programa de realidad aumentada. El sensor fue colocado a una distancia inicial de $20 [\text{cm}]$ y se utilizó una escala de 0.02 para la visualización de los resultados.

A continuación se muestran mediante imágenes los resultados de la prueba realizada en laboratorio, sobre el pórtico a ensayar.

En la Figura 77, se puede ver la ventana de Matlab, cuando se está ejecutando la aplicación AR, donde el usuario debe correr el programa “leerdato3” para inicializarlo, y se muestran continuamente los resultados de cada lectura, los cuales, son enviados al servidor en formato JSON, como se observa en la última línea.

En la Figura 78, se observan los resultados del análisis matricial realizado por Matlab, para un desplazamiento del pórtico de $15 [\text{cm}]$.

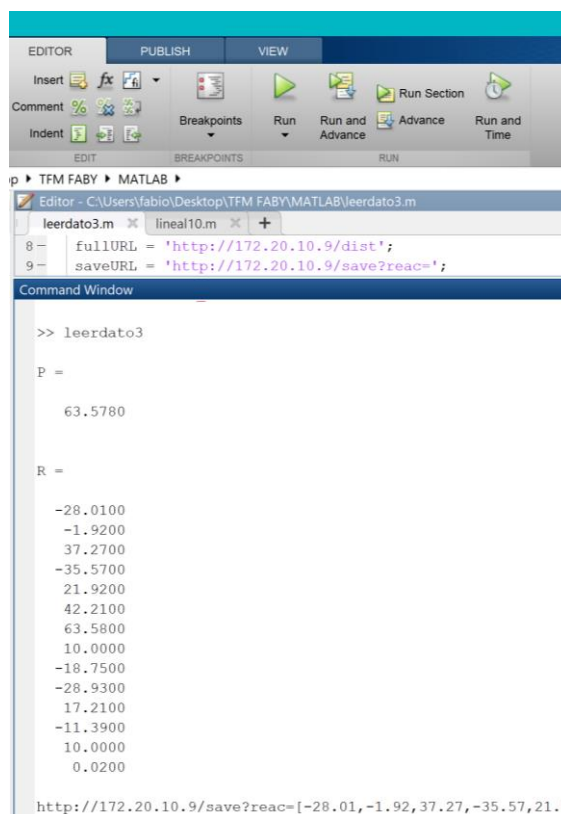


Figura 77. Ventana de Resultados Matlab durante la ejecución de la aplicación AR
Fuente: Elaboración propia

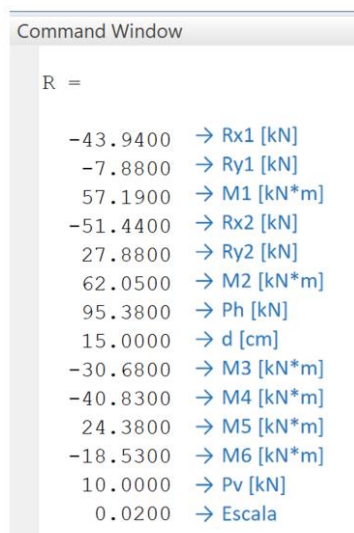


Figura 78. Resultados de cálculo en Matlab para $d=15[cm]$
Fuente: Elaboración propia

A continuación, para el mismo estado de carga, a partir de la Figura 79 a la Figura 84, se muestran estos resultados vistos por el usuario desde las gafas HoloLens de AR, los cuales incluyen las reacciones, diagramas de momentos, cortantes, axiles, fuerza actuante y desplazamiento registrado.

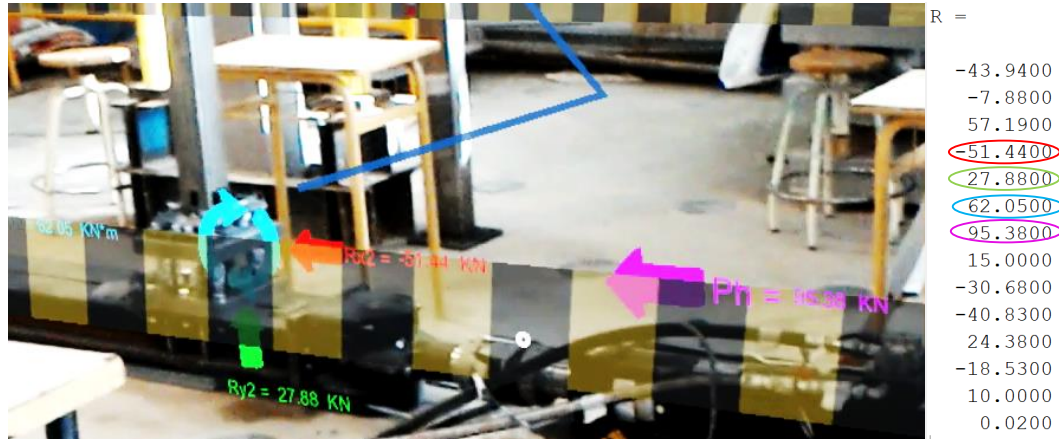


Figura 79. Reacciones nodo 4 y fuerza horizontal actuante en AR, y resultados Matlab
Fuente: Elaboración propia

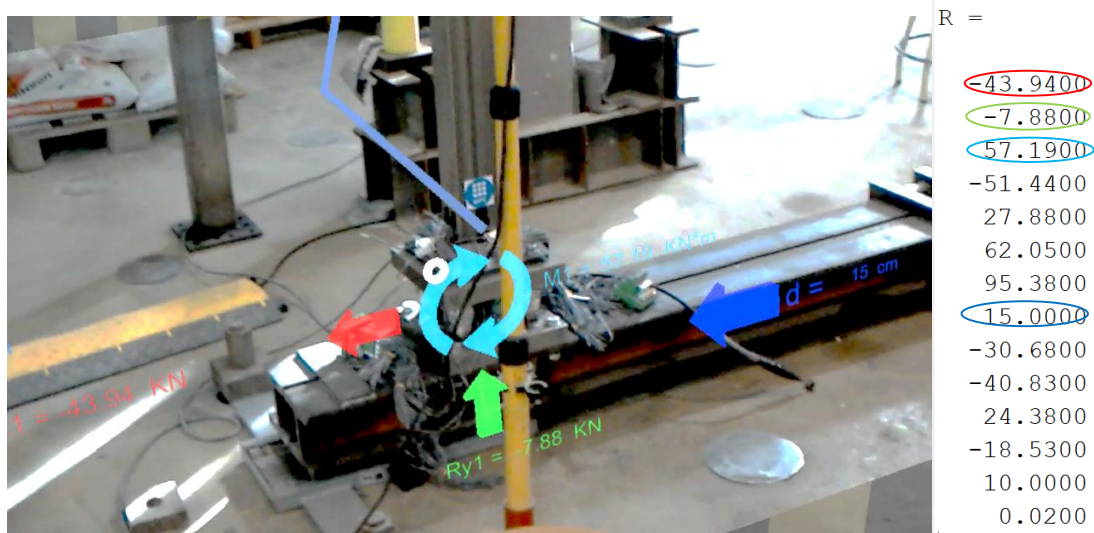


Figura 80. Reacciones nodo 3 y desplazamiento registrado en AR, y resultados Matlab
Fuente: Elaboración propia

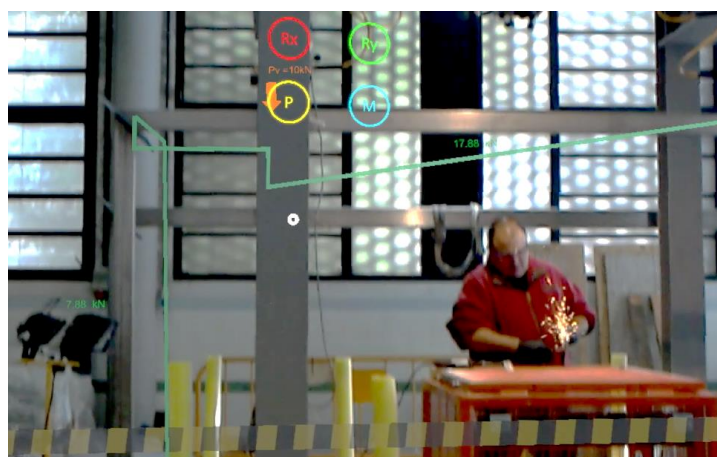


Figura 81. Diagrama de esfuerzos cortantes durante las pruebas del sistema AR
Fuente: Elaboración propia



Figura 82. Diagrama de momentos flectores durante las pruebas del sistema AR
Fuente: Elaboración propia



Figura 83. Diagrama de momentos flectores durante las pruebas del sistema AR
Fuente: Elaboración propia

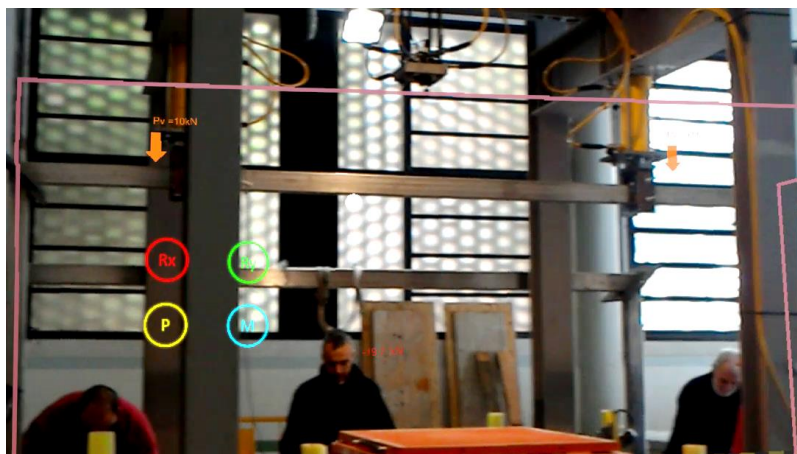


Figura 84. Diagrama de esfuerzos axiales durante las pruebas del sistema AR
Fuente: Elaboración propia

En la Figura 85, se puede observar la interacción del usuario con la aplicación AR, durante en la prueba realizada en laboratorio. Mediante el uso de los botones (también virtuales), puede activar o desactivar los gráficos según lo requiera. En este caso, se desactivó el diagrama de axiles, y se tienen activados los de momentos flectores y cortantes.

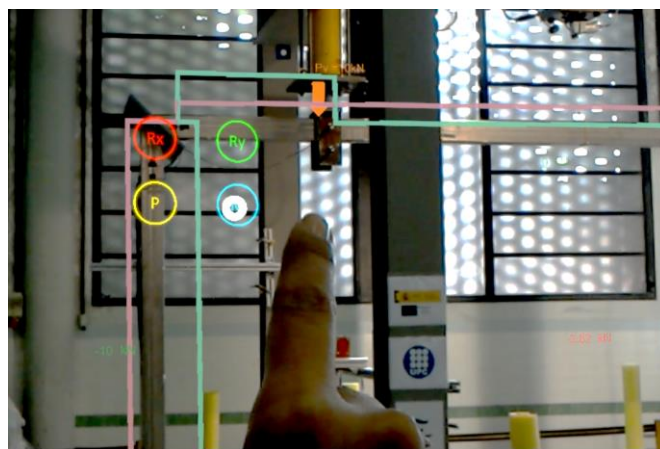


Figura 85. Interacción del usuario durante las pruebas del sistema AR (botones, diagrama de momentos y esfuerzos cortantes)
Fuente: Elaboración propia

En la Figura 86, se observa la señal de peligro cuando el usuario sobrepasa los límites de seguridad. Adicionalmente, se activa una alarma sonora y luz roja, hasta que el usuario se sitúe en zona segura.



Figura 86. Señal de peligro por ingresar dentro del área restringida
Fuente: Elaboración propia

En la Figura 87, los profesores de estructuras interactúan con la aplicación AR durante la prueba realizada.



Figura 87. Profesores de la UPC interactuando con la aplicación AR en laboratorio de estructuras
Fuente: Elaboración propia

A efectos de verificación, se introdujeron los mismos datos en la aplicación de móvil "FrameDesign". A partir de la Figura 88 a la Figura 91 se pueden ver los resultados de esta aplicación, que al compararlos con los obtenidos en mediante el sistema AR en la prueba de laboratorio, resultan ser los mismos. Por lo que se puede asegurar que los resultados de la aplicación desarrollada son fiables.

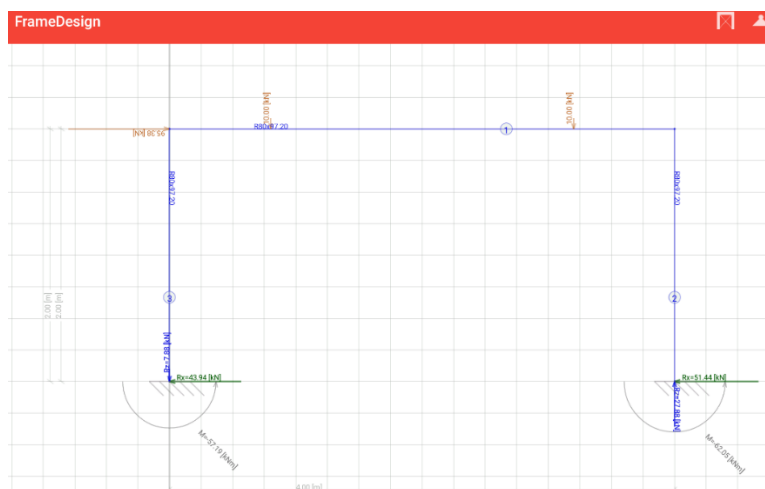


Figura 88. Reacciones obtenidas en aplicación "FrameDesign"
Fuente: (LetsConstruct, 2010) FrameDesign [Aplicación móvil]

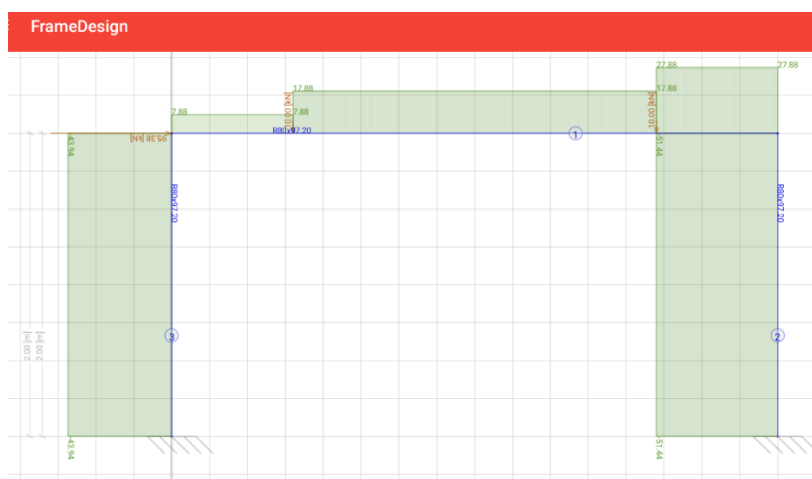


Figura 89. Diagrama de esfuerzos cortantes en aplicación "FrameDesign"
Fuente: (LetsConstruct, 2010) FrameDesign [Aplicación móvil]

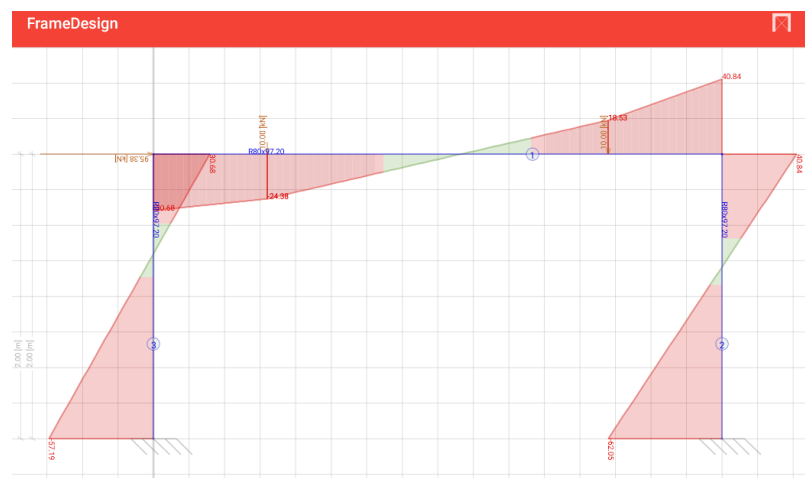


Figura 90. Diagrama de momentos flectores en aplicación "FrameDesign"
Fuente: (LetsConstruct, 2010) FrameDesign [Aplicación móvil]

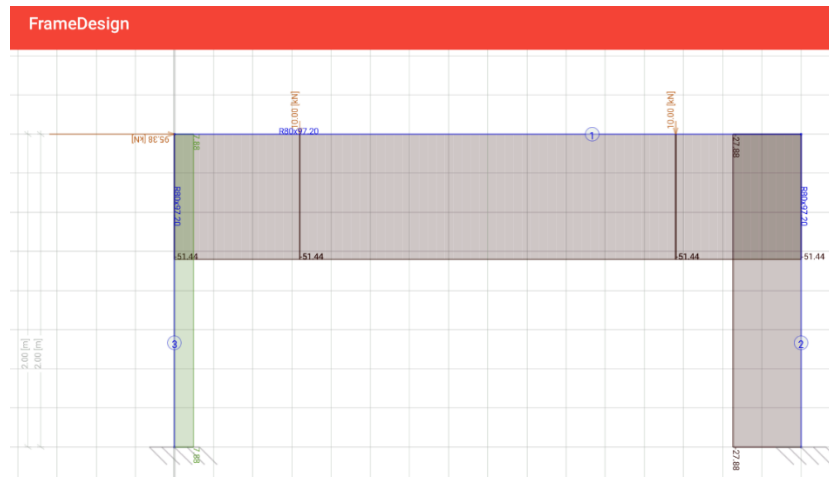


Figura 91. Diagrama de esfuerzos axiales en aplicación "FrameDesign"
Fuente: (LetsConstruct, 2010) FrameDesign [Aplicación móvil]

Ensayo pórtico "S2"

Una vez realizadas las pruebas necesarias, se ejecutó la aplicación AR en el ensayo oficial del pórtico, el cual fue etiquetado como "S2" dentro del proyecto UE "Comportamiento estructural de pórticos de acero inoxidable. Seguridad frente a acciones accidentales de sismo y fuego ", mencionado anteriormente.

La carga vertical máxima aplicada fue de 84 [kN], se situó el sensor a una distancia inicial de la viga de 40 [cm], y se aplicó una escala de 0.02 para la representación gráfica de los diagramas.

En la Figura 92, se observa el pórtico antes y después de ser ensayado. A partir de la Figura 93 a la Figura 100, se observan los distintos elementos que aplicación de Realidad Aumentada nos permite visualizar través de las gafas AR Microsoft HoloLens.



Figura 92. Pórtico antes y después de ser ensayado
Fuente: Elaboración propia



Figura 93. Diagramas de momentos, axiles y cortantes visualizados en AR durante ensayo de pórtico
Fuente: Elaboración propia

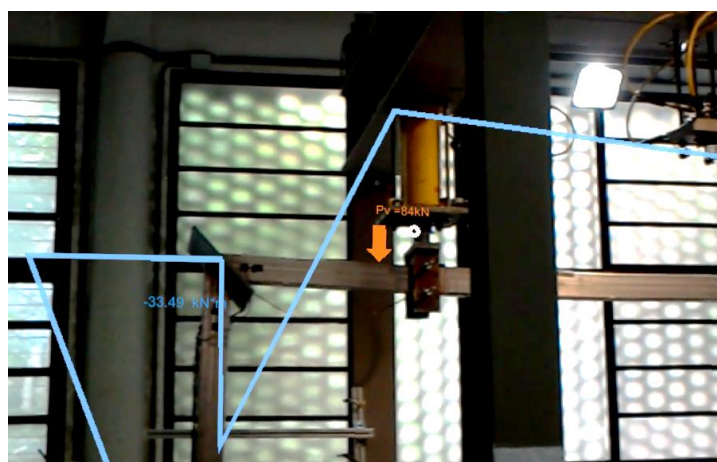


Figura 94. Carga vertical aplicada y diagrama de momentos flectores visualizados en AR
Fuente: Elaboración propia

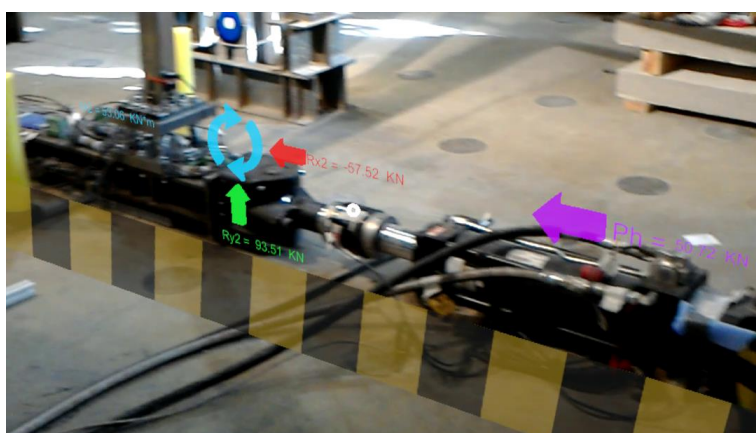


Figura 95. Reacciones en nodo 4 y fuerza horizontal aplicada, visualizadas en AR
Fuente: Elaboración propia

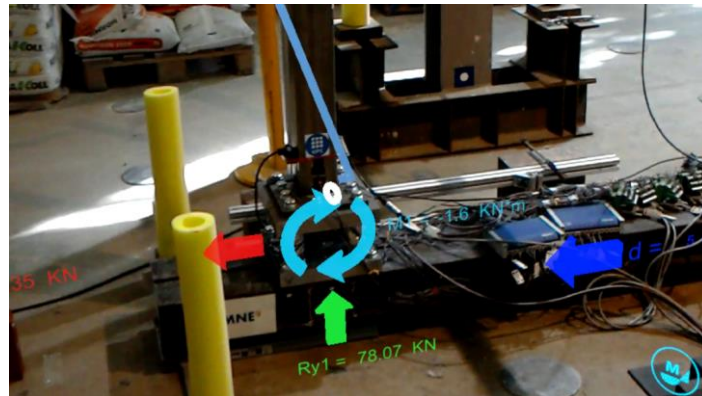


Figura 96. Reacciones en nodo 3 y desplazamiento, visualizados en AR durante ensayo del pórtico

Fuente: Elaboración propia

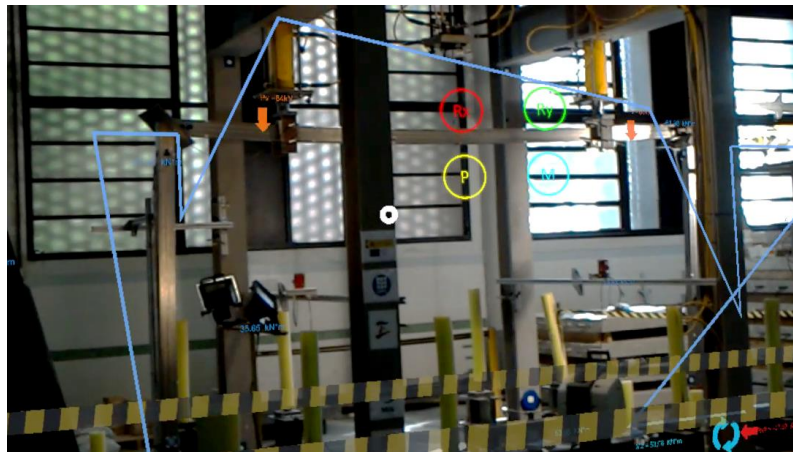


Figura 97. Diagramas de momentos flectores visualizados en AR durante ensayo del pórtico

Fuente: Elaboración propia



Figura 98. Diagramas de esfuerzos cortantes visualizados en AR durante ensayo del pórtico

Fuente: Elaboración propia



Figura 99. Diagramas de esfuerzos axiales visualizados en AR durante ensayo de pórtico
Fuente: Elaboración propia



Figura 100. Señal de peligro al sobrepasar los límites de seguridad durante ensayo de pórtico
Fuente: Elaboración propia

Durante el ensayo se observaron resultados numéricos correctos y válidos. El desplazamiento leído por el sensor coincidía con el registrado en los equipos. Por otro lado, el valor de la fuerza horizontal aplicada se alejaba del valor de la fuerza calculada, a medida que la deformación era mayor. Esto se debe a que la última, es resultante de un análisis lineal y el acero inoxidable es un material no lineal. Este comportamiento se puede observar en la Figura 101, donde se toma como ejemplo una deformación de 80[mm], resultado de una fuerza horizontal de 50[kN] en un análisis lineal y 22[kN] en el caso no lineal.

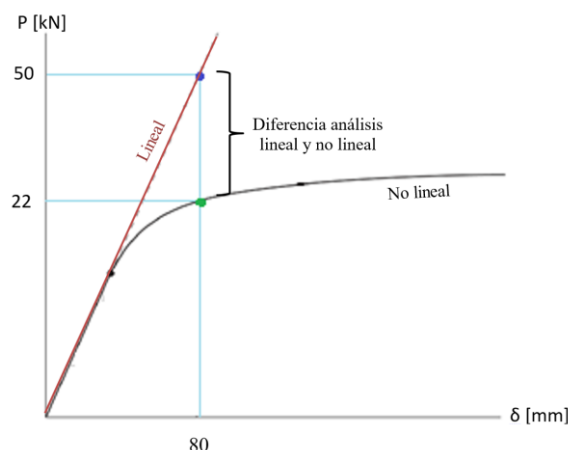


Figura 101. Diagrama lineal vs. no lineal, valores extraídos del ensayo del pórtico
Fuente: Elaboración propia

Durante todo el ensayo se presentó un proceso de transmisión de datos y cálculo fluido. Los dispositivos empleados trabajaron adecuadamente, y en el tiempo esperado. La duración total del ensayo fue de 2.5 horas aproximadamente, tiempo en el cual los dispositivos trabajaron con normalidad, por lo que el resultado fue muy satisfactorio.

Entre las dificultades que se presentaron al momento de poner en práctica el sistema de Realidad Aumentada, se encuentra el hecho de que cuando el usuario se aleja del entorno, o la cámara de las HoloLens no reconoce o no escanea el lugar enfocado, vuelven a inicializarse buscando el marcador nuevamente, por lo que la aplicación para.

Normalmente, las gafas trabajan en espacios de 4[m]x4[m], al tratarse de un laboratorio de grandes dimensiones, se tuvo que leer el marcador reiteradas veces, lo cual fue dificultoso ya que las normas de seguridad no permiten situarse a una distancia cercana cuando se está ejecutando el ensayo. Una de las soluciones que se plantea, es el colocar el marcador en un sitio accesible en el momento del ensayo, y graficar los elementos virtuales tomando en cuenta la distancia a este punto. Otra posible solución es escanear el lugar en un menor ritmo, de manera que la cámara de las HoloLens pueda mapear el ambiente y no cambiar su referencia en el espacio.



Escola de Camins

Escola Tècnica Superior d'Enginyeria de Camins, Canals i Ports
UPC BARCELONATECH

CAPÍTULO VI: CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

6.1. Conclusiones

Los objetivos del proyecto fueron alcanzados satisfactoriamente. Se desarrollaron dos aplicaciones de realidad virtual, y una de realidad aumentada, que fueron aplicadas en ensayos de laboratorio de diferentes tipos de elementos estructurales de acero inoxidable.

El haber aplicado esta tecnología en los ensayos de laboratorio de los nuevos estudios desarrollados en la UPC, acerca del comportamiento de vigas, pilares y pórticos de acero inoxidable, constituye un paso importante para el desarrollo tecnológico dentro del ámbito de la ingeniería estructural. A su vez, las aplicaciones desarrolladas permitieron percibir estos ensayos desde otra perspectiva.

Se abarcaron temas de seguridad, considerando el área restringida dentro de los ensayos, activando una alerta al usuario que sobrepase estos límites, de manera que la aplicación también pueda verse como una herramienta formativa en este ámbito.

Se ha logrado medir un dato físico utilizando un sensor, procesarlo y enviarlo, tanto mediante un cable, como de manera inalámbrica a través de un servidor. Con lo cual, se obtiene un mejor flujo de datos, versatilidad en el montaje del sensor y una libertad de movimiento con las gafas de realidad aumentada, ya que no requiere conexión al ordenador.

Se implementó la formulación matemática de la elástica de vigas y pilares en la aplicación de Realidad Virtual. Además, se desarrolló un código en Matlab, que realiza el análisis estructural de un pórtico mediante el método matricial en el rango lineal, para posteriormente enviar los resultados que se visualizan en la aplicación de Realidad Aumentada.

De acuerdo a estudios previos realizados en pórticos de acero inoxidable, siempre se debería realizar un análisis de segundo orden en este tipo de estructuras, ya que son más susceptibles a estos efectos que las de acero al carbono. Esto quedó demostrado al notar una mayor variación de la fuerza aplicada, entre un análisis lineal y no lineal, para

un mismo desplazamiento, a medida que éste crecía. En el ensayo del pórtico se observó un comportamiento no lineal como se esperaba, pero la fuerza horizontal resultante del cálculo lineal del sistema AR, tenía un valor mayor. En cuanto al comportamiento de vigas y pilares, las ecuaciones de la elástica proporcionan un resultado adecuado para su fin, ya que el objetivo es netamente visual.

Las aplicaciones de realidad virtual desarrolladas, permitieron transportar al usuario al laboratorio donde se llevaron a cabo los ensayos, mediante un entorno totalmente ficticio, a tiempo real, utilizando gafas VR o desde el ordenador.

En el caso de las vigas, no fue necesaria la aplicación de una escala visual de los desplazamientos, ya que fueron notorios en el entorno virtual a escala real. Sin embargo, en el caso de los pilares, al tratarse de desplazamientos muy pequeños, es necesario aplicar una escala que permita mostrar los resultados de manera que sean perceptibles al ojo humano. Por lo tanto, se concluye que la aplicación de realidad virtual para ensayos de pilares, bajo las condiciones planteadas, resulta favorable si se aplica una escala que maximice los desplazamientos, pero esto provoca una simulación menos real.

Aunque las aplicaciones de realidad virtual son netamente de uso visual y no muestran resultados matemáticos importantes, pueden ser muy útiles en el ámbito de la educación. Sirven como herramienta para una rápida comprensión del comportamiento de estos elementos estructurales, bajo solicitaciones determinadas, ya que transportan al usuario a un ambiente cercano a la realidad.

En cuanto a la aplicación de Realidad Aumentada, ésta se aplicó a un ensayo real, donde el usuario puede ver los resultados del análisis estructural de un pórtico al instante, a tiempo real, de manera gráfica, sobre un entorno real y de acuerdo a las solicitaciones bajo las cuales está sometido. La aplicación proporciona resultados fiables e inmediatos que fueron verificados con otro programa estructural.

Se puede concluir que, la realidad aumentada abarca mucho más que la realidad virtual, porque nos da la oportunidad de estar presentes, observando mediante elementos virtuales, lo que es imperceptible a la vista y disfrutar de un entorno visual a niveles más altos.

Mediante el desarrollo de estas aplicaciones, se ha logrado vencer la barrera entre la tecnología y la ingeniería civil, alcanzando niveles tecnológicos importantes.

6.2. Recomendaciones

En base al estudio y aplicación desarrollada, se recomienda tener en cuenta los fines para los cuales se utilizará el sensor al momento de seleccionarlo. Se debe considerar su precisión y rango de medición de acuerdo al uso que se le vaya a dar. Al haber utilizado herramientas de bajo coste, las lecturas de los desplazamientos fueron al centímetro, sin embargo, si se requiere una mayor precisión, como es en el caso de ensayos de laboratorio, se recomienda utilizar sensores más potentes y de mayor costo.

Por otro lado, si se perciben retrasos en la visualización de los elementos dentro de la aplicación VR, se recomienda variar los tiempos de espera (*delay*) de los códigos desarrollados, de manera que se genere un manejo de datos fluido.

Se recomienda utilizar la menor cantidad de objetos dentro de la plataforma Unity, para incrementar los FPS, y evitar una visualización lenta. Si se requiere utilizar un objeto cuya geometría no se encuentre dentro de las opciones de Unity, se recomienda dibujarlo en Revit e importarlo, para no generar una carga computacional muy alta.

Además, como mejora de las aplicaciones de realidad virtual, se recomienda añadir más elementos en el modelo de Revit, que hagan que el usuario tenga la sensación de estar presente en un entorno aún más real. Sin embargo, se debe tomar en cuenta y cuidar la velocidad de transmisión de datos para evitar una ejecución lenta del sistema, ya que a mayor cantidad de elementos, se produce una mayor carga computacional.

En cuanto al sistema de Realidad Aumentada, cuando se traten de aplicaciones donde el acceso a distancias cortas está restringido, se recomienda colocar el marcador en una posición accesible, a partir de la cual, se pueden añadir los elementos virtuales midiendo la distancia entre ambos.

Además, se recomienda que luego de leer el marcador, se muevan lentamente las HoloLens, para que se sitúen en el espacio y puedan escanear la habitación correctamente, de manera que se evite que ésta pierda su posición espacial.

6.3. Futuras líneas de investigación

Esta tecnología nunca antes aplicada en ensayos de laboratorio de estructuras, constituye una base importante, a nivel académico y profesional, para investigaciones

futuras, en cuanto al desarrollo de herramientas tecnológicas aplicadas en el ámbito de la ingeniería estructural.

A nivel académico, pueden llegar a ser herramientas importantes dentro de la capacitación y educación, tanto de temas estructurales, como de seguridad. Explotar aún más estas herramientas, permite una comprensión mucho más eficiente de lo que sucede en el comportamiento estructural de distintos elementos, ya que se observan gráficamente las solicitaciones y resultados del cálculo al instante, sin necesidad de introducir los datos en un ordenador.

Adicionar funciones y elementos de seguridad, puede ser de gran utilidad en la capacitación de seguridad industrial en ensayos de laboratorio, donde el usuario aprenda de manera “presencial” las normas a ser aplicadas.

Debido a que se adoptó un análisis estructural dentro del rango lineal, los resultados pueden variar al tratarse de un pórtico de acero inoxidable. Por este motivo, se recomienda que para estudios futuros, se desarrolle un código de cálculo considerando un análisis no lineal, en el que se tomen en cuenta los efectos de segundo orden que son significativos en este tipo de estructuras.

El sistema AR desarrollado ha sido implementado para un tipo de estructura en específico, como es el pórtico. Sin embargo, mejorando el código del programa de cálculo de Matlab, se puede aplicar a casos más complejos, introduciendo mayor cantidad de variables, y adicionando o modificando objetos en el código dentro de Unity. La aplicación podría ser utilizada en estructuras más complejas, o en la obtención de tensiones de los elementos utilizando el método de elementos finitos.

A nivel profesional, la aplicación resulta ser una base importante para avances futuros. El sistema fue aplicado a una estructura sencilla como el pórtico, el cual existe físicamente, está sometido a cargas reales, experimenta un desplazamiento real, y se obtienen inmediatamente los resultados visualizados sobre la estructura real de manera digital. Esto constituye una base para desarrollar sistemas AR para estructuras de mayor dimensión.

Además, el modelo se actualiza constantemente en base al desplazamiento leído por un sensor de bajo costo, y a una transmisión de datos inalámbrica a tiempo real. De modo que a nivel profesional, el uso de esta aplicación facilitaría el trabajo de cálculo de una estructura y lo que antes tomaba días, se resolvería en instantes.

Si se instalan sensores y se extraen datos de deformaciones, podremos conocer a tiempo real, el estado tensional de la estructura. Esto evitaría que el ingeniero tenga que leer un dato de manera manual, modelar la estructura en el ordenador, introducir el dato y analizar el comportamiento después del cálculo. Con esta aplicación se reduciría notablemente los tiempos de cálculo estructural de una estructura existente, y se reducirían los errores al ser un sistema automatizado.

Por otro lado, tomando en cuenta la automatización en la lectura de datos de la deformación, y el modelo desarrollado en Revit, como modelo de datos IFC, se podría automatizar a tiempo real un modelo BIM, con toda la información de una obra, que podrían ser visualizada mediante aplicaciones de Realidad Virtual o Aumentada. Esta transferencia de información, se podría efectuar mediante un manejo de datos IFC (Industry Foundation Classes), actuando conjuntamente con archivos JSON, ya que es un formato de intercambio de datos ligero y universal, que permite un intercambio fluido mediante la web.

La realidad aumentada es y será una revolución tecnológica, una herramienta que está siendo utilizada en muchas ramas, desde la ingeniería hasta la medicina. La aplicación dentro de la ingeniería estructural, que se le ha dado en el presente trabajo, impulsa a desarrollar avances tecnológicos que pretenden alcanzar niveles muy altos dentro de la ingeniería estructural, de manera que no se quede atrás ante la revolución tecnológica que se vive en la actualidad.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Arduino.cc (2018). *Arduino. (1.8.8.)*. [Software]. Descargado de: <https://www.arduino.cc/>
- [2] MathWorks (2018). *Matlab (R2018b 9.5.0.944444)*. [Software]. Descargado de: <https://www.mathworks.com/products/matlab.html>
- [3] Unity Technologies ApS (2018). *Unity (2018.2.15f1)*. [Software]. Descargado de: <https://unity3d.com/es/get-unity/download>
- [4] PTC Inc. (2018). *Vuforia Engine (8.0.)*. [Software]. Descargado de: <https://www.vuforia.com/>
- [5] Autodesk (2017). *Autodesk Revit (17.0.416.0)*. [Software]. Descargado de: <https://www.autodesk.com/>
- [6] LetsConstruct (2010). *FrameDesign*. [Aplicación móvil]. Descargado de: <https://play.google.com/store/apps>
- [7] EuroInox (2017). *Manual de Diseño para Acero Inoxidable Estructural* (Cuarta Ed.).
- [8] Arrayago, I., (2011). *Comportamiento estructural de vigas de acero inoxidable ferrítico frente a cargas concentradas* (Trabajo Final de Máster). Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona. Disponible en: <https://upcommons.upc.edu/handle/2099.1/12998> [Último acceso: 21 de Enero 2019]
- [9] European Committee for standardization (2005), Eurocode 3: Design of Steel Structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings. *EN 1993-1-1, vol. 1* (2005), Brussels.
- [10] Walport, F., Gardner, L., Real, E., Arrayago, I., & Nethercot, D. A. (2019). Effects of material nonlinearity on the global analysis and stability of stainless steel frames. *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 152, pp. 173-182.
- [11] Gardner, L. (24-27 de Julio 2018). Stability and Design of Stainless Steel Structures - Review and Outlook. *Eighth International Conference on Thin-Walled Structures*. Conferencia llevada a cabo en Lisbon, Portugal.
- [12] Li, X., Yi, W., Chi, H., Wang, X., & Chan, A. P. C. (2018). A critical review of virtual and augmented reality (VR/AR) applications in construction safety. *Automation in Construction*, vol. 86, pp. 150–162.
- [13] Heydarian, A., Carneiro, J. P., Gerber, D., Becerik-gerber, B., Hayes, T., & Wood, W., (2015) Immersive virtual environments versus physical built environments : A benchmarking study for building design and user-built environment explorations. *Automation in Construction*, vol. 54, pp. 116–126.
- [14] Whyte, J., Bouchlaghem, N., Thorpe, A., & McCaffer, R. (2000). From CAD to virtual reality: modelling approaches, data exchange and interactive 3D building design tools. *Automation in Construction*, vol. 10, pp. 43–55.

- [15] Nogales, J.A., (2018). *La digitalización en la fase de ejecución de proyectos constructivos* (Trabajo Final de Máster). Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona. Disponible en: <https://upcommons.upc.edu/handle/2117/118140> [Último acceso: 21 de Enero 2019]
- [16] de Coss, O. (2017). *Realidad aumentada aplicada a la construcción* (Trabajo Final de Máster). Universidad Politècnica de Catalunya, Barcelona. Disponible en: <https://upcommons.upc.edu/handle/2117/105654> [Último acceso: 21 de Enero 2019]
- [17] Chavarri, G. M. *La realidad aumentada como medio de visualización del modelo BIM en la construcción* (Trabajo Final de Máster). Universidad Politècnica de Catalunya, Barcelona. Disponible en: <https://upcommons.upc.edu/handle/2117/117172> [Último acceso: 21 de Enero 2019]
- [18] Botton, C. (2018). Supporting constructability analysis meetings with Immersive Virtual Reality-based collaborative BIM 4D simulation. *Automation in Construction*, vol. 96, pp. 1–15.
- [19] Araujo, S. J. (2017) *Posibilidad de la realidad virtual en entornos BIM* (Trabajo Final de Máster). Universidad Politècnica de Catalunya, Barcelona. Disponible en: <https://upcommons.upc.edu/handle/2117/101909>. [Último acceso: 21 de Enero 2019]
- [20] Du, J., Zou, Z., Shi, Y., & Zhao, D. (2018). Zero latency: Real-time synchronization of BIM data in virtual reality for collaborative decision-making. *Automation in Construction*. Vol. 85, pp. 51-64.
- [21] K. Afsari, C. M. Eastman, and D. Castro-lacouture. (2017). JavaScript Object Notation (JSON) data serialization for IFC schema in web-based BIM data exchange. *Automation in Construction*. Vol. 77, pp. 24-51.
- [22] Rebollo, S. (2017). *Realidad Virtual para la formación de PRL en la construcción. Desarrollo de un Serious Game inmersivo* (Trabajo Final de Máster). Universidad Politècnica de Catalunya, Barcelona. Disponible en: <https://upcommons.upc.edu/handle/2117/115356> [Último acceso: 21 de Enero 2019]
- [23] Paes, D., Arantes, E., & Irizarry, J. (2017). Immersive environment for improving the understanding of architectural 3D models: Comparing user spatial perception between immersive and traditional virtual reality systems. *Automation in Construction*, vol. 84, pp. 292–303.
- [24] Jankovic, L., Jankovic, S., Chan, A. H. C., & Little, G. H. (2002). Can bottom-up modelling in virtual reality replace conventional structural analysis methods?. *Automation in Construction*, vol. 12, pp. 133–138.
- [25] Sampaio, A. Z., & Martins, O. P. (2014). The application of virtual reality technology in the construction of bridge: The cantilever and incremental launching methods. *Automation in Construction*, vol. 37, pp. 58–67.

- [26] Hou, L., Wang, X., & Truijens, M. (2015). Using Augmented Reality to Facilitate Piping Assembly : An Experiment-Based Evaluation. *Journal of Computing in Civil Engineering*, vol. 29, no. 1, pp. 1–12.
- [27] Lin, T., Liu, C., Tsai, M., & Kang, S. (2015). Using Augmented Reality in a Multiscreen Environment for Construction Discussion. *Journal of Computing in Civil Engineering*, vol. 29, no. 6, pp. 1–9.
- [28] Shirazi, A., Asce, S. M., Behzadan, A. H., & Asce, A. M. (2015). Design and Assessment of a Mobile Augmented Reality-Based Information Delivery Tool for Construction and Civil Engineering Curriculum. *Journal of Professional Issues in Engineering Education and Practice*, vol. 141, no. 3, pp. 1–10.
- [29] Zhou, Y., Luo, H., & Yang, Y. (2017). Implementation of augmented reality for segment displacement inspection during tunneling construction. *Automation in Construction*, vol. 82, pp. 112–121.
- [30] Universidad de Sevilla. (Sin fecha). Tema 11. Inestabilidad en barras. Pandeo. *Resistencia de Materiales. Estructuras.*, Sevilla, España.
- [31] Hurtado, J. E. (Sin fecha). *Análisis matricial de estructuras*. Bogotá, Colombia. Disponible en: <http://bdigital.unal.edu.co/> [Último acceso: 10 de Diciembre 2018]
- [32] Herrador, R. E. (2009). *Guía de Usuario de Arduino*. San Francisco, California, USA: Creative Commons
- [33] Arduino. (2018). *Arduino* [Online]. Disponible en: <https://www.arduino.cc/> [Último acceso: 15 de Diciembre 2018]
- [34] Espressif Systems (2018). *Technical Reference Manual (V3.9.)*. Disponible en: www.espressif.com [Último acceso: 22 de Diciembre 2018]
- [35] Microsoft Corporation. (2017). *Microsoft Visual Studio (15.8.7)*. [Software] Descargado de: <https://visualstudio.microsoft.com/es/>
- [36] HTC Corporation (2018). *Vive*. [Online]. Disponible en: <https://www.vive.com/>. [Último acceso: 21 de Diciembre 2018]
- [37] Microsoft Corporation. (2018). *Microsoft HoloLens*. [Online]. Disponible en: <https://www.microsoft.com/es-es/hololens>. [Último acceso: 23 de Diciembre 2018]

